



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL USO DEL SUELO EN LAS PLANTACIONES FORESTALES MEDIANTE UN BALANCE EXERGÉTICO

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

NICOLÁS ANDRÉS GONZALEZ GONZÁLEZ

Guía: DRA. YANNAY CASAS LEDÓN

Co-guía: DR. MAURICIO AGUAYO ARIAS

Comisión: DR. ALBERTO ARANEDA CASTILLO

Concepción, Chile

2022

“ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL USO DEL SUELO EN LAS PLANTACIONES FORESTALES MEDIANTE UN BALANCE EXERGÉTICO.”


Profesor Guía: Dra. Yannay Casas Ledón



Profesor Co-Guía: Dr. Mauricio Aguayo Arias



Profesor Comisión: Dr. Alberto Araneda Castillo



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, mayo 2022

Índice de contenido

AGRADECIMIENTOS.....	6
1. RESUMEN.	7
2. INTRODUCCIÓN.	8
2.1 Pregunta de investigación	10
2.2 Objetivo general.....	10
2.3 Objetivos específicos	10
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	11
3.1. Suelo como un recurso natural.	11
3.2. Cambio de usos del suelo a plantaciones forestales en Chile.	12
3.3. Análisis de Ciclo de Vida como indicador de los impactos del uso del suelo.	15
3.4. Indicadores para cuantificar el impacto en el uso del suelo.	17
3.5. Producción Primaria Neta como indicador del uso del suelo.....	19
3.6. Uso de la Exergía para determinar la eficiencia del uso de los recursos.	20
3.7. Estudios de los impactos del uso del suelo en las plantaciones forestales en Chile.....	25
4. METODOLOGIA.	28
4.1. Calcular la PPN_{potencial} y la PPN_{actual} en las plantaciones forestales de especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> en términos de MJex/m²*año.....	29
4.1.1. Definir el área de estudio, tipos de especies forestales y año de referencia.....	29
4.1.2. Estimación de la PPN _{potencial} del suelo cubierto de plantaciones forestales en la región del Biobío y Ñuble en términos de Exergía para el año 2015.....	31
4.1.3. Estimación de la PPN _{total} en las plantaciones forestales en las regiones del Biobío y Ñuble en términos de Exergía para el año 2015.	32
4.1.3.1. Estimación de la subcomponente PPN _{aérea} y PPN _{subterránea}	34
4.1.3.2. Estimación de la subcomponente PPN _{aérea}	36
4.1.3.4. PPN _{total} en términos de Exergía.....	43
4.2. Realizar inventario de los Recursos No Locales y manejo forestal en las plantaciones forestales para las especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> en términos de MJex/m²*año.	43
4.2.1. Aplicar la metodología Análisis de Ciclo de vida (ACV), en los manejos forestales para la especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	43
4.2.2 Identificación de los Recursos No Locales (RNL), en los manejos forestal para la especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	46
4.2.3. Aplicar el método CExD de los RNL para convertirlos en términos de Exergía.	50

4.3. Evaluar la eficiencia del uso del suelo como recurso en las plantaciones forestales de las especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> mediante el indicador Producción Neta anual de Exergía $\Delta NExP$	52
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	54
5.1. Componentes de la Producción Primaria Neta potencial en términos de Exergía.	54
5.2. Componente de la PPN _{total} en términos de Exergía.....	55
5.3. Análisis de los Recursos no locales para la especie <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> en términos de Exergía MJex/m ² *año.	60
5.4. Análisis del indicador Producción Neta anual de Exergía ($\Delta NExP$).	62
6.- CONCLUSIÓN.	69
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.	71
8. ANEXOS.	76

Índice de figuras

Figura 1. Superficie de plantaciones forestales acumulada a diciembre de cada año periodo desde 1978 a 2015.	14
Figura 2: Cadena de causa-efecto de la ocupación del suelo y su transformación.	16
Figura 3: Proceso de transformación en términos de exergía.	21
Figura 4. Metodología según los objetivos del estudio.	28
Figura 5. Mapa de las regiones del Biobío y Ñuble año 2019.	29
Figura 6. Porcentaje de superficie en ha de las plantaciones forestales según especie en la región del Biobío año 2015.	30
Figura 7. Biomasa calculadas y considerada para cada subcomponente de la PPN aérea para la especie <i>Pinus radiata</i>	37
Figura 8. Biomasa considerada y calculada para cada subcomponente de la PPN aérea para la especie <i>Eucalyptus globulus</i>	37
Figura 9. Esquemas del límite del sistema para las plantaciones forestales <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	44
Figura 10. PPN _{potencial} y PPN _{total} para plantaciones forestales especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> en términos de Exergía (MJex/m ² *año).	56
Figura 11. RNL para 1 m ² de plantación forestal de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> en términos de Exergía MJex/m ² *año.	60

Figura 12. Indicador de Producción Neta anual de Exergía (ΔNE_{xP}) para 1 m ² de plantación establecida de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> , en las regiones de Biobío y Ñuble, año 2015.	62
Figura 13. PPN _{potencial} de las plantaciones forestales en la Regiones de Biobío y Ñuble para el año 2015.	76
Figura 14. Capa mundial basado en la disponibilidad de PPN _{potencial} en unidades de MJex /m ² año.	77
Figura 15. Descripción esquemas de manejo para madera libre de nudos.	85
Figura 16. balance de Exergía con biomasa útil, PPN _{cosecha} y PPN _{residuos}	86

Índice de tablas

Tabla 1. Indicadores para determinar el impacto del uso del suelo en la categoría de daño a la Salud del Ecosistema.	17
Tabla 2. Indicadores para determinar el impacto del uso del suelo en la categoría de daño a los Recursos Naturales.	18
Tabla 3. Tipo de recursos considerado en algunos métodos de contabilización de recursos basados en la Exergía.	22
Tabla 4. Valores utilizados para la estimación de la PPN _{aérea} y PPN _{subterránea} clasificada según cada especie de plantación forestal.	35
Tabla 5. Parámetros para el cálculo de la PPN _{cosechado} para la especie <i>Pinus radiata</i>	39
Tabla 6. Parámetros para el cálculo de la PPN _{cosechado} para la especie <i>Eucalyptus globulus</i>	40
Tabla 7. Parámetros para el cálculo de la PPN _{residual} de las ramas para la especie <i>Pinus radiata</i>	41
Tabla 8. Descripción de los RNL en el manejo forestal para la especie <i>Pinus radiata</i> , en relación a una hectárea de plantación establecida:.....	47
Tabla 9. Descripción de los RNL en el manejo forestal para la especie <i>Eucalyptus globulus</i> , en relación a una hectárea de plantación establecida:	48
Tabla 10. Descripción de los RNL utilizados en las maquinarias y el transporte al interior del predio para la especie <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> , en relación a una hectárea de plantación establecida:	49
Tabla 11. Otros RNL para la herramienta motosierra en faenas silvícola, en relación a 1 hectárea de plantación establecida para la especie <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	50

Tabla 12. CExD en [MJex/Kg] para cada RNL en relación a una hectárea de plantación establecida de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	51
Tabla 13. Parámetros para la PPN potencial para las especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> en términos de Exergía MJex/m ² *año.	54
Tabla 14. Valores en términos de exergía MJex/m ² año para la PPN aérea y PPN subterránea para las especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> , en relación a 1 m ² de plantación establecida.	59
Tabla 15. Balance Exergético de sistemas productivos de manejo agrícola y forestal en diferentes países del continente américa.	66
Tabla 16. Conversión de los RNL de los manejos forestales de las especies <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> a unidades de Kg/m ² *año.	83
Tabla 16. Resumen de los rendimientos de los manejos forestales en las especies <i>Pinus radita</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	84

AGRADECIMIENTOS.

Un largo camino recorrido lleno de emociones, sacrificios, estudio. Muchas etapas en este periodo de madurez. Recuerdo haber empezado siendo un joven con ilusiones de conquistar el mundo, sin embargo muchas veces tomé el camino equivocado, pero ahora me doy cuenta de que cada experiencia fue un aprendizaje, donde fijarse metas es esencial y la perseverancia, esfuerzo y ánimos van de la mano.

Es muy gratificante este momento de culminar la carrera de Ingeniera Ambiental y poder aportar al cuidado del planeta, compartir mis conocimientos y combatir el cambio climático.

Debo agradecer a toda mi familia por ser mi pilar fundamental emocional y económicamente, su apoyo ahora es fruto de mi orgullo. Agradecer a mis amigos de la universidad por tantas alegrías, horas de estudios y de esparcimiento; todos llegaremos a la metas así que ánimo a los que faltan, porque los espera el tata. También agradezco a mis amigos del colegio, por su compañía en los momentos más tristes de esta etapa, especialmente a Mariana, Andrés y Carmen que estuvieron conmigo en cada instante.

Agradecer a todos los docentes del centro EULA por su paciencia y buena voluntad, no solo al momento de enseñar, sino también por los consejos de vida entregados con el objetivo de formar buenos profesionales. Agradecer enormemente a mi profesora guía Yannay Casas quien tuvo mucha paciencia conmigo y me explicó mil veces cuando no entendía el término Exergía y muchas cosas más, profesora junto a su apoyo incondicional logramos terminar este proyecto gratamente, muchas gracias a todos.

Se agradece el apoyo por parte del proyecto fondecyt iniciación ANID/FONDECYT/11170302 y ANID/FONDAP/15130015 en el desarrollo de la tesis.

“Toda nuestra comida proviene del suelo. Cuando comenzamos a destruir la biología del suelo, destruimos las redes alimentarias que nos dan vida.”

- Paul Staments

1. RESUMEN.

El indicador de Producción Neta anual de Exergía (ΔNExP) se utilizó para medir la sostenibilidad de los sistemas de producción forestal. Este indicador proporciona una idea de la eficiencia de como los recursos son usados naturales y no naturales son usados en un determinado sistema productivo. Para la aplicación de este indicador, se analizaron plantaciones forestales que se llevan a cabo en dos regiones de Chile ubicadas en la zona centro-sur (Biobío y Ñuble). Las especies de plantaciones forestales estudiadas fueron *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

El ΔNExP se estimó mediante la diferencia entre la biomasa total anual producida ($\text{PPN}_{\text{total}}$), menos el consumo de Exergía acumulado incorporado en Recursos No Locales (RNL) aplicados por el humano, además del potencial natural de producción de biomasa ($\text{PPN}_{\text{potencial}}$) de un suelo sin la intervención humana.

El indicador propuesto mostro eficiencia positiva para las plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus* (**28,025** MJex/ha*año) y *Pinus radiata* (**7,622** MJex/ha*año). Los valores de (ΔNExP) positivo indican que el sistema de producción es eficiente, lo que significa que la biomasa producida por las plantaciones forestales es mayor que el consumo de recursos locales ($\text{PPN}_{\text{potencial}}$) y no locales (RNL) demandados para producirla. Mientras más positivos sean los valores del indicador más eficiente es el sistema, es por ello que la especie *Eucalyptus globulus* presentó mayor eficiencia Exergética que la especie *Pinus radiata*. Este comportamiento se debe a los mayores rendimientos estandarizados al año para la especie *Eucalyptus globulus* que el *Pinus radiata*, y al mismo tiempo por los menores demanda de RNL.

Los resultados del análisis de Exergía destacaron la complejidad (ΔNExP) y su dependencia de las condiciones locales. Sin embargo, el indicador propuesto solo considera la cantidad de recursos totales durante el manejo forestal, pero no tiene en cuenta los impactos ambientales relacionados. Asimismo, el análisis de sostenibilidad involucra dimensiones ambientales.

2. INTRODUCCIÓN.

Desde tiempo ancestrales el ser humano ha utilizado y transformado los recursos naturales para poder mejorar su calidad de vida. El suelo como un recurso natural nos proporciona una serie de productos y servicios ecosistémicos, en donde destaca el servicios de abastecimientos, como es la obtención de madera y cultivos agrícolas.

El ser humano ha alterado el 70% de las superficies terrestres pero esta transformación de los suelos ha sido de manera insostenible debido a los factores del aumento de la población mundial y además el fomento del crecimiento económico.

La intervención antrópica en el suelo produce impactos sobre el entorno natural provocando pérdidas en el ecosistema, existen indicadores del impacto del uso del suelo sobre la salud de un ecosistema, tales como el indicador de regulación de la erosión fundamentado en la Pérdida de la Producción Primaria Neta correspondiente a la energía solar requerida para ser generada, así indicando la calidad del ecosistema. El indicador biomasa natural, ha propuesto utilizar la Exergía solar metabolizada por la vegetación natural fundamentado en la Pérdida de Producción Primaria Neta.

La Producción Primaria Neta (PPN) se ha utilizado como un indicador de la intensidad del uso del suelo, debido a sus características de estar relacionada con la resiliencia de los ecosistemas y la acumulación de material orgánico de la energía trófica, pero carece de poder visualizar la eficiencia del suelo, en relación al potencial útil que este posee de un recurso natural.

La Exergía nos permite visualizar la eficiencia y calidad de los recursos, siendo esta la cantidad máxima de trabajo útil derivado del suelo, obteniendo resultados en una medida estandarizada MJex/m²*año. Se propone utilizar un nuevo indicador de balance de los recursos en un sistema de biomasa terrestre denominado Producción Neta anual de Exergía (ΔNExP) que tiene como finalidad dar una visión completa

sobre el equilibrio de los recursos naturales de la Tierra, evaluando la eficiencia del uso del suelo y sostenibilidad de los sistema forestales.

En Chile en el año 1931 se promulgo la Ley de Bosques que marca el inicio de los incentivos para realizar plantaciones forestales, para el año 1974 existían alrededor de 300 mil hectáreas de plantaciones forestales en el territorio nacional, resultados de la aplicación de la Ley.

Con la aprobación del Decreto Ley 701, en el año 1974, de fomento forestal orientado a incrementar, proteger y promover la actividad forestal con impulso al sector privado como un actor estratégico en la economía del país. Para fines del año 2015 en Chile las plantaciones forestales cubren una superficie aproximada de 2,4 millones de hectáreas, con un dominio de la especies *Pinus radiata* 58,4%, seguido por la especies *Eucalyptus globulus* 24,1%. Siendo las Regiones del Biobío y Ñuble que presentan la mayor cantidad de hectáreas de plantaciones forestales a nivel nacional 38,1%.

Existen estudios donde se determinaron los efectos espaciales y temporales de los cambios de usos del suelo sobre la PPN expresado en unidades de Exergía para las regiones de Biobío y Ñuble durante el periodo 2000 a 2014. Según Goecke (2019) las plantaciones forestales muestran un incremento cobertura de 28% entre los años 1994 a 2014. Siendo las plantaciones forestales la eficiencia más alta para el uso del suelo con un valor de 88,25 – 91,4 MJex/m²*año, debido por su amplia expansión territorial de las plantaciones forestales, rápido crecimiento de las especies forestales y el manejo forestal intensivo, estos factores tiene un efecto positivo sobre la PPN.

Es necesario disminuir la incertidumbre de qué papel juega la intervención humana, la calidad y eficiencia que se utilizan los recursos naturales y productos asociados al manejo forestal de las plantaciones forestales, desde la preparación del suelo para la posterior plantación de la plántula hasta la cosecha final de los pinos y/o eucaliptus. El objetivo de este estudio es determinar la eficiencia del uso del suelo como recurso natural en las plantaciones forestales en las Regiones del Biobío y Ñuble para el año 2015 mediante el indicador Producción Neta anual de Exergía

(Δ NExp) que entrega un balance con visión más completa de los recursos naturales (suelo), los recursos agroquímicos (pesticidas y herbicidas) combustibles, aceites lubricantes, etc. usados durante el manejo forestal desde la preparación del suelo hasta la cosecha final. Así poder evaluar la eficiencia del uso del suelo considerando el manejo forestal y promover un desarrollo más sostenible.

2.1 Pregunta de investigación

¿Cuál es la eficiencia del uso del suelo como recurso natural en las plantaciones forestales en las Regiones del Biobío y Ñuble mediante el indicador Producción anual Neta de Exergía?

2.2 Objetivo general

Evaluar la eficiencia sobre el uso del suelo como recurso en las plantaciones forestales en las Regiones del Biobío y Ñuble mediante el indicador de Producción Neta anual de Exergía (Δ NExp).

2.3 Objetivos específicos

- I. Calcular la PPN _{potencial} y la PPN _{actual} en las plantaciones forestales de especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de MJex/m²*año.
- II. Realizar el inventario de los recursos no locales y manejo forestal en las plantaciones forestales de especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de MJex/m²*año.
- III. Evaluar la eficiencia del uso del suelo como recurso en las plantaciones forestales de las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* mediante el indicador Producción Neta anual de Exergía Δ NExp.

3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.

3.1. Suelo como un recurso natural.

Los suelos son un recurso fundamental para la creación de una serie de productos y servicios ecosistémicos esenciales, por ejemplo, constituyen la mayor reserva de carbono orgánico (FAO, 2015). El suelo ancla toda la vida en la Tierra, su entorno está compuesto por innumerables especies que crean un ecosistema complejo y dinámico. El suelo se encuentra entre los recursos más valiosos para los humanos, dándole provisión para la alimentación, energía, el espacio vital y desarrollo (Song et al., 2018).

Desde el punto de vista del suelo como recurso natural, es relevante que de éste obtenemos la biomasa producida para los alimentos agropecuarios, combustibles o productos químicos. Sin embargo, la disponibilidad de la tierra (suelo) es el factor limitante, ya que este recurso natural no es para siempre. Es necesario que su uso sea de manera eficiente para promover una economía más sostenible (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

El suelo nos brinda un conjunto de servicios ecosistémicos que se clasifican en cuatro grupos (Millennium Ecosystem Assessment, 2005):

- I. Servicios de abastecimientos: son los beneficios de los productos obtenidos de los ecosistemas, por ejemplo: agua, alimentos, madera, combustibles, etc.
- II. Servicios de regulación: son aquellos que están involucrados en la regulación de la calidad del aire, la fertilidad de los suelos, la polinización de los cultivos, entre otros.
- III. Servicios culturales: corresponde a los beneficios inmateriales que las personas obtienen de los ecosistemas como la diversidad cultural, recreación y turismo, etc.
- IV. Servicios de apoyo: estos son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, se incluye el ciclo del agua, ciclo de nutrientes, formación de suelo, fotosíntesis y la producción primaria.

Los impactos en los servicios de apoyo son de manera indirectos a diferencia de los otros tres servicios, además estos impactos ocurren transcurrido un gran periodo de tiempo (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Los servicios de abastecimientos, como los alimentos, agua y madera son imprescindibles para que el humano pueda tener una buena calidad de vida. Tanto así que el uso de estos ha aumentado rápidamente y en grandes cantidades, de hecho, ha sido más rápido que el crecimiento poblacional. Sin embargo, el crecimiento humano ha sido posible, por los usos y calidad absoluta de algunos servicios de abastecimientos producidos por el entorno y sigue creciendo llegando al caso que estos se utilizan en tasas insostenibles (FAO, 2019).

La madera se extrae de los bosques nativos y de las plantaciones forestales, se utiliza para una variedad de necesidades, como la construcción de vivienda, manufacturas, calefacción, combustibles, pulpa de celulosa, etc. La humanidad ha plantado desde hace miles de años con fines ornamentales, pero sin duda el principal objetivos de las plantaciones forestales, es la producción de madera u otros productos de uso industrial (Prado D., 2015).

La actividad forestal se beneficia de los servicios ecosistémicos y a su vez proporciona servicios de abastecimiento. Es necesario conocer la realidad local de cada país de sus tipos de usos de suelo y reconocer los beneficios e impactos que se obtiene a cambiar a un suelo de plantaciones forestales.

3.2. Cambio de usos del suelo a plantaciones forestales en Chile.

El cambio de uso del suelo es la transformación de la cubierta vegetal original para convertirla a otros usos y/o la modificación de la composición de las especies nativas (SEMARNAT, 2017).

Nos referimos con este cambio de uso de suelo a los que ocurre por causa y consecuencia del cambio ambiental global, dichos cambios alteran considerablemente el balance energético y los ciclos biogeoquímicos de la tierra, lo que se atribuye al cambio climáticos y, a su vez, afecta las propiedades de la tierra, la calidad de los recursos naturales, la pérdida de la biodiversidad y la provisión de

los servicios ecosistémicos (Taelman, Schaubroeck, De Meester, Boone, & Dewulf, 2016).

Los bosques de plantaciones forestales corresponden a aquellos de origen a través de la plantación de árboles de una misma especie o combinaciones con otras, efectuadas por el ser humano, cuyas plantaciones son modificadas para obtener una mejora continua en términos de la productividad y calidad (INFOR, 2015).

Las principales especies forestales en Chile, fueron introducidas de manera fortuita, Arturo Junge, propietario forestal de Concepción encargó semillas de pino Oregón, las sembró y al poco tiempo noto que no era la especie encargada. Averiguó que se trataba de una especie originaria de California en Estados Unidos la especie *Pinus radiata*. Entre el año 1907 y 1912 la compañía de carbón en Lota plantaron alrededor de 400 (ha) de *Pinus radiata*. En cuanto a la especie *Eucalyptus globulus* originaria de Victoria y Tasmania en Australia, se cree que fue introducida en Chile en el año 1923. Plántulas destinadas a Perú que por miedo a que se marchitaran fueron plantadas en Valparaíso de Chile (Prado D., 2015).

En el año 1974 en Chile existían cerca de 300.000 hectáreas (ha) de plantaciones forestales, especialmente de la especie *Pinus radiata*, resultado de la aplicación de la Ley de Bosques de 1931 (Prado D., 2015). A partir del año 1975 comienza a realizarse las primeras plantaciones por parte de las empresas y forestales privadas beneficiadas por el Decreto Ley N° 701 de fomento forestal orientado a la protección, incremento y manejo racional de las actividades forestales. Durante los primeros 10 años de la promulgación de la Ley, la tasa de forestación bonificada fue de 42.000 ha por año en promedio (Prado D., 2015). Para fines del año 2015 las plantaciones forestales en Chile cubrían una superficie aproximada de 2.396.562 ha. La composición de estas plantaciones para el año 2015 corresponde a 58,4% a la especie *Pinus radiata*, un 24,1% a la especie *Eucalyptus globulus*, un 10,8% a *Eucalyptus nitens* y por ultimo un 6,7% a otras especies (INFOR, 2017).

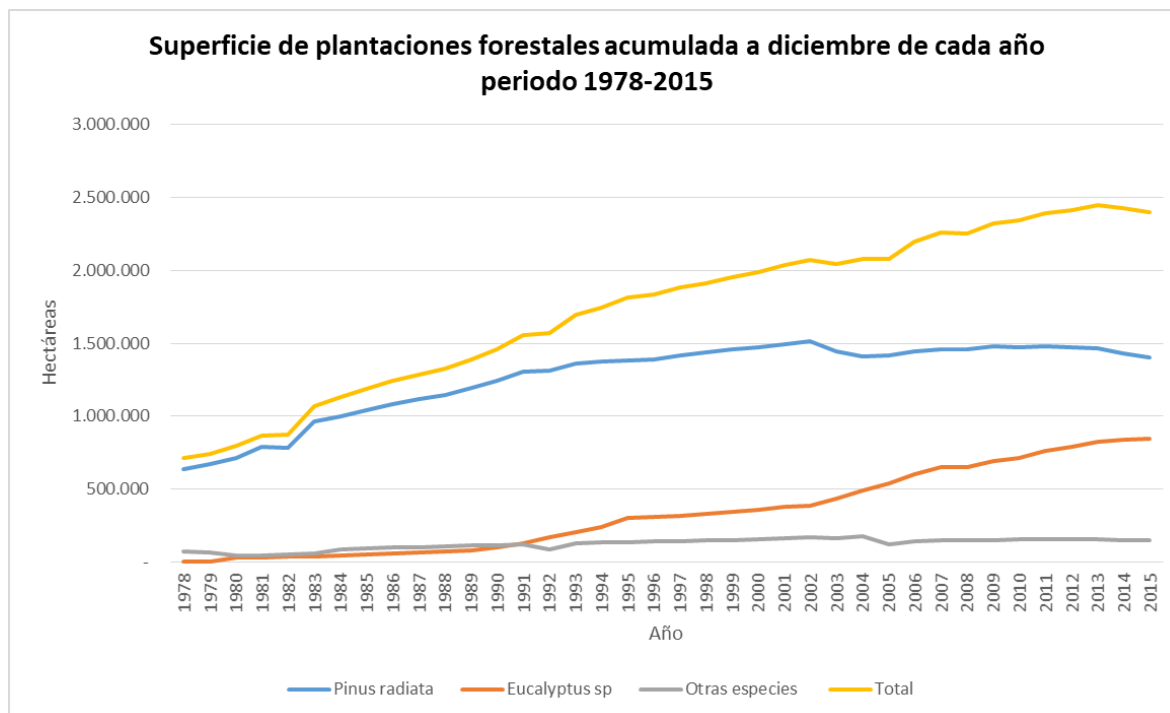


Figura 1. Superficie de plantaciones forestales acumulada a diciembre de cada año periodo desde 1978 a 2015.

Fuente: Elaboración propia en base a Anuario Forestal 2017 (INFOR, 2017).

En la figura 1 se puede observar el constante crecimiento de las plantaciones forestales en el territorio nacional, principalmente siendo las plantaciones de *Pinus radiata* dominante en el periodo de 1978 a 2015, en sus inicios en el año 1978 de 640.721 ha de plantación a nivel nacional y llegando a las 1.400.259 ha de plantación forestal a diciembre del año 2015. De igual manera las plantaciones de *Eucalyptus sp* han tenido un aumento a través de los años principalmente las especies *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, en el año 1995 la cantidad de 302.248 ha, desde el año 2013 en adelante la plantación de cantidad sobre 800.000 ha por año. La categoría total de la figura 1, contempla las plantaciones forestales *Pinus radiata*, *Eucalyptus sp* y otras especies exóticas, dicha categoría no incluye especies de bosque nativo para este caso. Algunos ejemplos serían *Atriplex spp*, *Pinus poderosa*, *Pseudotsuga menziesii*, etc.

En su conjunto las plantaciones forestales en el año 2000 alcanzan 1.989.101 ha, donde el 38,1% de las plantaciones se encuentran en la región de Biobío y Ñuble,

seguido con un 20,1% la región de la Araucanía y mientras un 0,3% correspondiente a la región Metropolitana (INFOR, 2017).

Debido a los anterior desde el año 1975 los bosques nativos se han reducidos a menos de una décima parte dentro de la zona costera de Chile. Lo que conlleva que recientemente existan más plantaciones que bosques naturales, cabe mencionar también que en las regiones de Ñuble y Biobío existe una clara transición de bosques nativos (esclerófilos y de hoja caducas) a plantaciones de árboles comerciales de pino y eucaliptus (Banfield, Braun, Barra, Castillo, & Vogt, 2018).

Desde la década de 1990, las plantaciones forestales se establecieron con predominancia en el oeste con especie *Eucalyptus* y en el este con *Pinus*. Las regiones de Ñuble y Biobío contemplan la mayor superficie de plantaciones forestales del país aproximadamente 1.000.000 ha plantadas de *Pinus* y *Eucalyptus* (INFOR, 2015).

Para evaluar estos impactos asociados al uso del suelo provocado por la intervención humana, el enfoque de la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite considerar el suelo como recursos y evaluar los impactos asociados.

3.3. Análisis de Ciclo de Vida como indicador de los impactos del uso del suelo.

Para cuantificar el posible impacto que una actividad antrópica en el suelo puede tener en el entorno natural, vinculado a un determinado servicio ecosistémicos, el Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta que se ha utilizado mucho para cuantificar los posibles impactos (Taelman et al., 2016). La evaluación de los impactos del uso del suelo en el ACV está orientado a la ocupación del suelo (fracción potencial de desaparición ($PDF/m^2 \cdot \text{año}$) y el cambio de uso de suelo (PDF/m^2), los cuales se requieren de un factores de caracterización (CF). Estos CF, dependiendo del método de evaluación de impactos que se utilice, puede ser punto final o punto intermedio orientados al daño y al problema respectivamente (Koellner, Baan, Beck, Souza, & Müller-wenk, 2013; Taelman et al., 2016). Los impactos

generados a partir del uso del suelo, ocupación o transformación de este, se ilustran en la Figura 2.



Figura 2: Cadena de causa-efecto de la ocupación del suelo y su transformación.

Fuente: (Taelman et al., 2016).

Los principales impactos directos en mediano plazo (categoría de punto medio) del uso del suelo se relacionan con las actividades antrópicas donde se incluye la propagación y fragmentación del suelo, sellado de superficies, modificación de la cubierta vegetal y la (sobre) explotación de los recursos (Taelman et al., 2016).

Mientras que algunos impactos pueden generar daños a largo plazos (categoría de punto final) y pueden dañar los recursos naturales, salud del ecosistema y/o salud humana, considerados como las Áreas de Protección (AdP), áreas de interés para el ser humano para proteger o sostener (Taelman et al., 2016). Es así como las intervenciones humanas en el suelo producen impactos directos sobre la naturaleza, provocando pérdidas en el ecosistema en el corto plazo y daño al largo plazo sobre el ser humano y/o el medio ambiente.

3.4. Indicadores para cuantificar el impacto en el uso del suelo.

La intervención antrópica en el suelo produce impactos directos sobre la naturaleza, provocando pérdidas en los ecosistemas y reservas naturales. Daños al largo plazo sobre las AdP (Salud del ecosistema y recursos naturales) en el contexto de la metodología ACV.

A continuación, en la tabla 1 se presentan los principales indicadores de los impactos del uso del suelo sobre la salud de los ecosistemas. En la tabla se presentan los impactos asociados a los recursos naturales.

Tabla 1. Indicadores para determinar el impacto del uso del suelo en la categoría de daño a la Salud del Ecosistema.

AdP	Indicadores	Fundamento	Referencias
Salud del Ecosistema	Calidad del suelo	Cambio de carbono orgánico del suelo.	Milà i Canals et al. (2007a) Brandão et al. (2001)
	Regulación de la erosión y del agua dulce, purificación del agua.	Toneladas de suelo erosionado ha-1 año-1), capacidad de intercambio catiónico, tasa de flujo de agua y tasa de recarga de agua.	Saad et al. (2011) Saad et al. (2013)
	Regulación de la erosión	Pérdida de la producción primaria neta (PPN).	Núñez et al. (2013)

Fuente: Elaboración propia en base: (Taelman et al., 2016).

El indicador regulación de la erosión fundamentada en la pérdida de la producción primaria neta (PPN) corresponde a la energía solar requerida para ser generado, así nos indica la calidad del ecosistema (Núñez, Antón, Muñoz, & Rieradevall, 2013)

Tabla 2. Indicadores para determinar el impacto del uso del suelo en la categoría de daño a los Recursos Naturales.

AdP	Indicadores	Fundamento	Referencias
Recursos Naturales	Biomasa Natural	Exergía solar metabolizada dentro de la vegetación natural.	Dewulf et al. (2007)
		Pérdida de la producción primaria neta (PPN).	Alvarenga et al. (2013b) Taelman et al. (2014) Alvarenga et al. (2015)
		Cambio de carbono orgánico del suelo.	Brandão and Milà i Canals (2013)
	Suelo	Energía solar requerida para regenerar el suelo.	Núñez et al. (2013)

Fuente: Elaboración propia en base:(Taelman et al., 2016).

En la tabla 2 el indicador biomasa natural, se ha propuesto utilizar la exergía solar metabolizada por la vegetación natural (J Dewulf et al., 2007). Ya que se sostiene que esta es la fuerza motriz para que el ecosistema natural se mantenga y que en muchos casos deja de estar disponible dado el uso del suelo.

Para las categorías de daño AdP salud del ecosistema y los recursos naturales, en el contexto de ACV se puede utilizar el indicador de la pérdida de PPN regulación de la erosión y el indicador de biomasa natural. La biomasa natural fundamentada por la pérdida de la producción primaria neta (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, & Huijbregts, 2013a; Haberl et al., 2007; Taelman et al., 2014, 2016). Han utilizado la pérdida de PPN como indicador de la intensidad del uso del suelo, debido a las características que está presenta.

3.5. Producción Primaria Neta como indicador del uso del suelo.

La Producción Primaria Neta determina la cantidad de energía disponible para la transferencia de las plantas a los otros niveles de la cadena trófica en un ecosistema. Es la cantidad neta de carbono asimilada mediante la fotosíntesis en la vegetación en un periodo de tiempo y se expresa en unidades de $g\ C/m^2 \cdot año$ (Haberl et al., 2007). Está constituyete una parte importante en la función del ecosistema y el balance de carbono sobre todo en los servicios ecosistémicos de apoyo. De igual forma la PPN depende de varios factores bióticos, como del tipo de vegetación, la irradiación solar, las condiciones climáticas, la fertilidad del suelo, además de los factores abióticos correspondientes a los recursos aplicados por el humano a un sistema natural para favorecer la calidad de la producción (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013a; Goecke, 2019).

Algunas características de la Producción Primaria Neta son las siguientes:

- La PPN está estrechamente relacionada con la resiliencia de los ecosistemas, la capacidad de amortiguación y la capacidad de absorción de desechos y emisiones, además se relaciona con el suministros de productos y servicios para los humanos (Erb et al., 2009).
- La acumulación de material orgánico depende de la energía trófica disponible para la transferencia de plantas hacia los otros niveles de la cadena trófica, cualquier daño a un sistema de apoyo clave como la PPN generaría un serio impacto a nivel global en el medio ambiente de la Tierra (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Por lo tanto, se afirma que los cambios producidos en la Producción Primaria Neta son un buen indicador de punto intermedio para el impacto sobre los procesos de soporte y de regulación del ecosistema (Langlois, Fréon, & Steyer, 2014), por dichas propiedades se propone la PPN como un óptimo punto de partida para determinar los impactos del uso del suelo sobre la salud de los ecosistemas (Taelman et al., 2016).

En este sentido, se han creados indicadores relacionado a la Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta, en adelante AHPPN, es un indicador que mide la magnitud de las actividades humana en un área definida en base al flujo de energía ecológica disponible (Beazley, 2007) y dichas actividades antrópicas tales como la deforestación tienen un efecto sustancial en la calidad de la PPN y en lo socioeconómico. Además, se puede estimar el efecto antrópico de los cambios productivos de la conversión y uso del suelo (PPN transformación) (Haberl et al., 2007).

Finalmente así poder evaluar la intensidad del uso del suelo relacionando los procesos naturales con los procesos socioeconómicos (Alvarenga et al., 2015; Erb et al., 2009; Taelman et al., 2016). Pero muchos de estos indicadores relacionados al uso del suelo, carecen de poder visualizar la eficiencia del uso del suelo, en relación al potencial útil que este posee de un recurso natural. En este sentido, la Exergía permite determinar la eficiencia y calidad del uso de los recursos.

3.6. Uso de la Exergía para determinar la eficiencia del uso de los recursos.

La Exergía, es la cantidad máxima de trabajo útil de un sistema o recurso que se obtiene, cuando este alcanza el equilibrio con su entorno a través de procesos reversibles en donde el recurso solo puede interactuar con el ambiente (Jo Dewulf et al., 2008). El termino Exergía está basado en la segunda ley de la termodinámica y a diferencia de la energía, la Exergía considera la irreversibilidad del sistema, por lo tanto la Exergía que entra es mayor a la Exergía de salida (Jo Dewulf et al., 2008). La figura 3 ilustra el proceso de transformación de ciertos recursos a productos y subproductos, calor, desecho y pérdida de Exergía en un proceso industrial. Se aprecia como el contenido exergético de los recursos disminuye debido a pérdidas exergéticas disipadas en el entorno (Jo Dewulf et al., 2008).

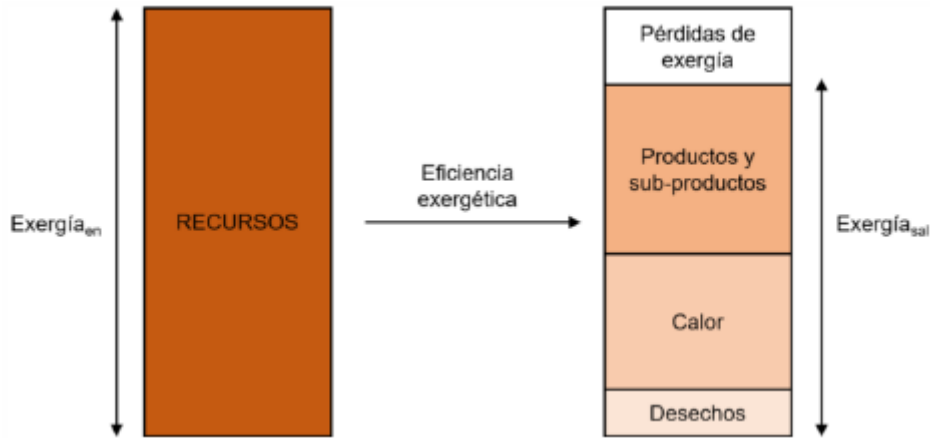


Figura 3: Proceso de transformación en términos de exergía.

Fuente: (Jo Dewulf et al., 2008).

Los análisis Exergéticos se han utilizado para la identificación de las ineficiencias de los procesos industriales, termoeconómicos y ambientales (Jo Dewulf et al., 2008). También dichos conceptos se integraron a la metodología ACV. En este caso, existen distintos métodos para contabilizar el consumo acumulado de los recursos de una forma estandarizada en términos de Exergía (MJex) Mega Joules de Exergía, como se muestra en la tabla 2, permitiendo visualizar los recursos materiales, energéticos y el mismo suelo como un todo (Jo Dewulf et al., 2008).

Para la contabilización de los recursos el método Demanda Acumulada de Exergía, en adelante CExD, se define como la suma de la Exergía de todos los recursos necesarios en un proceso o producto (Bösch, Hellweg, Huijbregts, & Frischknecht, 2007); sin embargo este método no contabiliza el suelo como un recurso. Por otra parte el método de Extracción Acumulada de Exergía desde el Entorno Natural, en adelante CEENE, cuantifica la exergía extraída o privada del entorno natural (J Dewulf et al., 2007), considerando el suelo como un recurso natural. Dicho modelo ha sido mejorado y actualizado (v2007, v2013 y v2014), como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Tipo de recursos considerado en algunos métodos de contabilización de recursos basados en la Exergía.

	<i>CExD</i>	<i>CEENE v2007</i>	<i>CEENE v2013</i>	<i>CEENE v2014</i>
<i>Recurso suelo</i>		•	•	•
<i>Recurso agua</i>	•	•	•	•
<i>Recursos minerales</i>	•	•	•	•
<i>Recurso metal</i>	•	•	•	•
<i>Recurso marino</i>				•
<i>Recursos fósiles</i>	•	•	•	•
<i>Recursos nucleares</i>	•	•	•	•

Fuente: Elaboración propia en base: (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013a; J Dewulf et al., 2007; Taelman et al., 2014).

En el método CEENE v2007 (J Dewulf et al., 2007), la ocupación del suelo se contabiliza a partir del contenido Exergético de la irradiación solar que sería metabolizada mediante la fotosíntesis en los ecosistemas naturales para la producción de biomasa.

La versión v2013 (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013a), incluye factores locales tales como el clima, la calidad del suelo y contenido de humedad al contabilizar la ocupación del suelo desde el contenido exergético de la Producción

Primaria Neta potencial, en adelante PPN_{potencial}, cuyos valores son específicos a nivel regional, país y continentes. La versión v2013 tiene un enfoque que diferencia sistema natural de los sistemas hechos por el humano, además de la creación de factores de conversión, en adelante FC, siendo más accesible la comparación con otros impactos en términos de Exergía.

La creación de los factores de caracterización es a nivel local del país, se crearon FC para 163 países incluyendo Chile. De los cuales, a 6 países con mayor superficie se les calculó FC a niveles regional, estos fueron: Australia, Brasil, Canadá, China, Estados Unidos y Rusia, todos estos FC en términos de Exergía. Estos FC, depende del potencial de vegetación (PPN_{potencial}) de casa sitio, calculado por (Haberl et al., 2007). el cual se convirtió a unidades de Exergía por medio de factores de conversión biomasa-exergía promedio cuyo valor es de 42,9 MJex/Kg C para 13 de los 14 biomas existentes (Olson et al., 2001).

El valor medio del FC para Chile, fue de 14.7 MJex/m²*año (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013a). La variabilidad que presenta Chile va desde 0 hasta 30,6 MJex/m²*año, relacionado con la diversidad de paisajes que se pueden encontrar a lo largo y ancho del país. Por lo tanto, al ser un parámetro basado en el potencial de la vegetación, este depende del lugar geográfico y sus condiciones ambientales. Estos, puede significar una sobreestimación en ciertas regiones del país, ya que la zona norte (desierto) presenta un FC menor a la zona sur (templado).

Alvarenga et al. (2013). Propone un nuevo indicador de balance de recursos naturales para sistemas de biomasa terrestres denominado Producción anual Neta de Exergía, en adelante $\Delta NExP$, que tiene como finalidad dar una visión completa sobre el equilibrio de los recursos naturales de la Tierra, evaluando la eficiencia del uso del suelo (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

El indicador $\Delta NExP$ se define como:

$$\Delta NExP: PPN \text{ total} - (RNL + PPN \text{ potencial})$$

Las entradas es la suma del consumo acumulativo anual incorporado en los recursos no locales introducidos por los humanos (RNL) y la producción de biomasa natural o $PPN_{\text{potencial}}$, el cual corresponde a una estimación de cuanta producción de biomasa ocurría en un suelo sin la intervención humana (Haberl et al., 2007). Donde las salidas es la producción de biomasa total a partir de un sistema antrópico PPN_{total} que incluye la $PPN_{\text{aérea}}$, biomasa sobre la superficie del suelo más la suma de la $PPN_{\text{subterránea}}$, biomasa debajo del suelo (Erb et al., 2009).

Una diferencia considerable entre la producción de biomasa natural y la biomasa forestal, es en este último que su producción final se basa en el consumo de los recursos no locales (RNL), es decir el uso de fertilizantes, riego, maquinaria e incluso la mano de obra humana (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

Este indicador $\Delta NExP$ se puede realizar considerando la Exergía de entradas y salidas de un sistema o recurso, en relación al potencial de trabajo útil que posee. Por ende, la Exergía determina la eficiencia y calidad del uso de los recursos, como resultado, un uso eficiente promoviendo una economía más sostenible.

Con el indicador $\Delta NExP$ nos brinda una visión completa desde los recursos naturales y no naturales, identificando las eficiencias e ineficiencias, sugiriendo una mejor gestión de los recursos naturales y el aumento en la productividad de los suelos son temas de importancia a nivel mundial, como parte del objetivo 15 “Vida de ecosistemas terrestres” de los objetivos del desarrollo sostenible de la ONU.

3.7. Estudios de los impactos del uso del suelo en las plantaciones forestales en Chile.

A pesar de bosques poblados de especies valiosas y biodiversas el desarrollo forestal en Chile se ha basado fundamentalmente en el monocultivo de *Pinus radiata*; especie forestal originario de los Estados Unidos de Norte América, introducido a inicios del siglo XX al país con la finalidad de ser utilizado en la construcción de minas de carbón en la región del Biobío, en el sur de Chile; si bien la madera de pino no resulto apropiado para dicha utilidad, desde el año 1930 ya existían grandes plantaciones forestales establecidas en la región (Defensores del Bosque Chileno, 1998).

La actividad forestal se beneficia de los servicios ecosistémicos y, a su vez los proporciona. Pero esta actividad puede tener tantos efectos positivos como también negativos sobre los sistemas, por ejemplo, de la manera positiva los bosques ayudan a mantener un ecosistema, sin embargo el efecto negativo de esto es que la aplicación de plaguicidas puede reducir la polinización natural y la deforestación pueden causar el aumento de inundaciones y fragmentación del suelo (FAO, 2019). Las plantaciones forestales extraen de los suelos más nutrientes de los que devuelven provocando una disminución paulatina de la fertilidad de los suelos (Defensores del Bosque Chileno, 1998).

Los bosques de plantación están sujetos a un rango de intervenciones de manejo forestal, cosecha, fermentación, raleo y replantaciones que tienen el potencial de alterar su capacidad para atenuar el suministros de contaminantes al suelo (Hughes & Quinn, 2019).

Si bien existen estudios relacionados al cambio de uso de suelo y sus consecuencias sobre la biodiversidad y el paisaje, entre otras variantes, dichos estudios omiten una perspectiva de visualizar el suelo como recurso natural, donde la actividad antrópica en el suelo contribuye significativamente a cambios en los servicios ecosistémicos (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013)

Según Goecke (2019), en su estudio se determinaron los efectos espaciales y temporales de los cambios del uso del suelo sobre la PPN expresada en unidades de Exergía para las regiones de Biobío y Ñuble durante el periodo 2000 a 2014. El factor de Exergía basado en la caracterización espacial fue estimado periodo de tiempo de PPN extraídos de MODIS y los FC de Exergía. Finalmente los cambios dinámicos de PPN por la transición de cada tipo de uso del suelo fue estudiado para identificar la fuerza motriz que influye en la productividad de biomasa, los resultados obtenidos confirman la importante influencia de las políticas de fomento forestal sobre cambios del uso del suelo, en particular, la transición a plantaciones forestales en las últimas dos décadas, las cuales muestran un incremento de cobertura de 28% entre 1994 a 2014. En consecuencia la eficiencia más alta para uso del suelo fue obtenida para plantaciones forestales durante todos los periodos estudiados 88,25 – 91,4 MJex/m²*año, debido a las altas reservas de carbono por m² asociadas a su manejo forestal intensivo. Desde el punto de vista de la transición de cambio del uso del suelo, se ha producido un efecto positivo sobre la PPN, siendo la expansión territorial de las plantaciones forestales un factor clave en la ganancia de la PPN, además durante todos los periodos de tiempo estudiados el intensivo manejo forestal favoreciendo el uso eficiente del suelo, pero implicando un alto consumo de recurso no locales (RNL) (Goecke, 2019; Martínez, Goecke, & Aguayo, 2019).

En esta misma línea, estudios realizados por Andrade (2020), cuantifico la Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (AHPPN) sobre el uso del suelo en la antigua región del Biobío para los años 2007 y 2015. Andrade (2020) concluyó que las plantaciones forestales contribuyeron en gran medida a la AHPPN regional, dado un alto grado de extracción de biomasa desde este uso del suelo, con lo cual, no está disponible para cumplir un rol en la calidad de los ecosistemas. Además, destaca que las plantaciones forestales están situadas mayoritariamente en zonas con mejor potencial de producción primaria neta (PPN_{potencial}), que junto al rápido crecimiento que tienen las especies exóticas en estos suelos y el manejo forestal asociado, tiene como resultado una alta productividad de biomasa. Estos factores podrían haber influido en el aumento progresivo del área ocupada por las

plantaciones forestales en el periodo de estudio, teniendo como consecuencia el aumento de AHPPN en 2015 (Andrade, 2020).

En base a los estudios descritos anteriormente ambas autoras concuerdan que es necesario poder disminuir la incertidumbre de qué papel juega la intervención humana al momento de producir biomasa. Para poder estimar dicha participación humana es necesario realizar un balance de visión más completa, Alvarenga et al. (2013) propone un nuevo indicador denominado Producción anual Neta de Exergía Δ NExP que evalúa la eficiencia del uso del suelo considerando el manejo forestal y así promover una economía más sostenible (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

4. METODOLOGIA.

En la siguiente figura 4 ilustra los pasos a seguir para determinar el indicador Producción Exergética anual neta $\Delta NExp$ del uso del suelo en las plantaciones forestales de especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, para las regiones del Biobío y Ñuble para el año 2015.

Objetivo 1. Calcular la $PPN_{potencial}$ y la PPN_{actual} en las plantaciones forestales de especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de $MJex/m^2 \cdot año$.

- Definir área de estudio, tipo especie forestales y año de referencia.
- Estimación de la $PPN_{potencial}$ del suelo cubierto de plantaciones forestales en la región del Biobío y Ñuble en términos de Exergía para el año 2015.
- Estimación de la PPN_{total} en las plantaciones forestales en las regiones del Biobío y Ñuble en términos de Exergía para el año 2015.

Objetivo 2. Realizar el inventario de los recursos no locales y manejo forestal en las plantaciones forestales de especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de $MJex/m^2 \cdot año$.

- Aplicar la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV), en el manejo forestal para la especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.
- Identificación de los Recursos No Locales (RNL), en el manejo forestal para la especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.
- Aplicar el método CExD de los RNL para convertirlos en términos de Exergía.

Objetivo 3. Evaluar la eficiencia del uso del suelo como recurso en las plantaciones forestales de las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* mediante el indicador Producción anual Neta de Exergía $\Delta NExp$

Figura 4. Metodología según los objetivos del estudio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1. Calcular la PPN potencial y la PPN actual en las plantaciones forestales de especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de MJex/m²*año.

4.1.1. Definir el área de estudio, tipos de especies forestales y año de referencia.

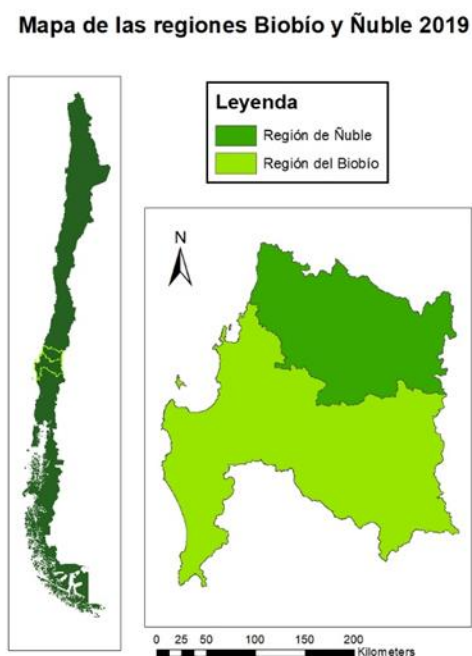


Figura 5. Mapa de las regiones del Biobío y Ñuble año 2019.

Fuente: Elaboración propia en base BCN, 2018.

El área a estudiar corresponde a la antigua región Biobío, actualmente divididas desde septiembre del año 2018 en la región Biobío y Ñuble, la antigua región consta con una superficie de 37.093 km², corresponde a la región chilena con más hectáreas de plantaciones forestales, cuya superficie de plantaciones forestales establecidas bordea un millón de hectáreas, siendo así el 38,1% de las plantaciones forestales a nivel nacional (ODEPA, 2018). Además, se considera la antigua región del Biobío debido que al momento de georreferenciar las plantaciones forestales del área de estudio se utilizó los datos del catastro de cobertura vegetal año 2015 (Conaf, 2015). Años de referencia para este estudio es el año 2015. A continuación, mapa de las regiones del Biobío y Ñuble año 2018.

Según el Anuario Forestal 2017 del Instituto Forestal (INFOR), las plantaciones forestales nacionales a diciembre del año 2015 corresponde a 2.396.562 ha, con un 58,4% a *Pinus radiata* y 24,1% *Eucalyptus globulus*. Además, informa que en la antigua región del Biobío tiene una superficie de plantaciones forestales de 913.173 ha. En la figura 6 se puede observar la cantidad de superficies de plantaciones forestales para las especies *Pinus radiata*, *Pinus ponderosa*, *Eucalyptus globulus* y *nitens*, *Pseudotsuga menziesii* y otras especies exóticas (INFOR, 2017).

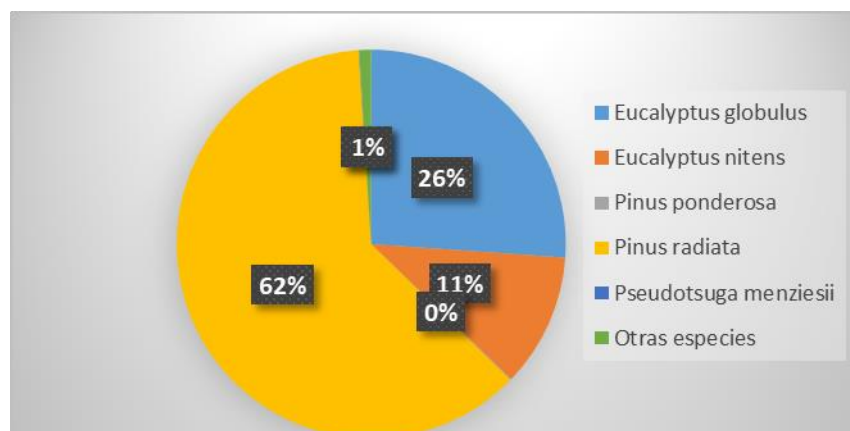


Figura 6. Porcentaje de superficie en ha de las plantaciones forestales según especie en la región del Biobío año 2015.

Fuente: Elaboración propia en base anuario forestal 2017 (INFOR, 2017).

Este estudio considera exclusivamente las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, siendo las especies de plantaciones forestales con mayor porcentaje de superficie plantada a nivel regional, para la especie *Pinus radiata* 62% y la especie *Eucalyptus globulus* 26% para el año 2015. Además, por la disponibilidad de datos utilizados del catastro de cobertura vegetal 2015 de la Corporación Nacional Forestal (Conaf), en este catastro solo se informa de las plantaciones forestales *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*; dicha base de datos georreferenciados con la distribución de las plantaciones forestales por especies en la región, estos datos georreferenciados nos permiten obtener más adelante la componente de Producción Primaria Neta potencial (PPN_{potencial}).

4.1.2. Estimación de la PPN_{potencial} del suelo cubierto de plantaciones forestales en la región del Biobío y Ñuble en términos de Exergía para el año 2015.

La Producción Primaria Neta Potencial (PPN_{potencial}), es una estimación de cuanta producción de biomasa ocurriría en un territorio si no es intervenido por los humanos (Haberl et al., 2007). La PPN_{potencial} es la biomasa natural utilizando únicamente insumos de su entorno natural, tales como la irradiación solar, lluvia, viento, humedad, etc. (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013). Para estimar la PPN_{potencial} de las plantaciones forestales de las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, se ocupará dos bases de datos:

- I. Catastro de cobertura vegetal 2015 (Conaf, 2015): permite la identificación de los usos del suelo, para este caso se utilizaron los usos del suelo plantaciones forestales para las especies *Pinus radita* y *Eucalyptus globulus* y para no sobreestimar el valor de la PPN_{potencial} solo se considera la clasificación plantaciones adultas para ambas especies. Utilizando el software ArcMap, se procedió a georreferenciar las plantaciones adultas en el área de estudio.
- II. Mapa mundial del factor de caracterización de los recursos terrestres en sistemas creados por el hombre, basado en las disponibilidad de la Producción Primaria Neta Potencial (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, & Huijbregts, 2013b). El mapa de la PPN_{potencial} nos permite obtener la dicha PPN de una superficie en términos de Exergía MJex/m²*año.

La capa de Alvarenga se basa en los resultados de (Haberl et al., 2007), en donde se utilizó el modelo dinámico de vegetación global (DGVM), así calculo la PPN_{potencial} en g C/m²*año mundial para el año 2000. En específico se utilizó el DCVM basado en procesos biogeoquímicos Lund-Potsdam-Jene (LPJ). En la capa de Alvarenga transformó estos valores desde las unidades de carbono a unidades de Exergía MJex/m²*año por medio de factores de conversión específicos para la vegetación natural de 13 de los 14 biomasas del planeta (Olson et al., 2001).

Para la obtención de los valores de la PPN _{potencial} en el Sistema de información geográfica (SIG) se realizó previamente la extracción del área de estudio región del Biobío y Ñuble desde la capa de Alvarenga de los PPN _{potencial}, para luego cambiar la resolución de la capa en 100 x 100 metros sin variar el valor de cada píxel en términos de Exergía. Esto con el objetivo de extraer por la herramienta por máscara el valor de los PPN _{potencial} en los uso del suelo de las plantaciones forestales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, para el año 2015.

Como la PPN _{potencial} depende de las características naturales de un territorio, se considerara una media de los valores obtenidos para los suelos de plantaciones forestales en ambas especies, ya que existen diferentes características geomorfológicas en las regiones Biobío y Ñuble.

4.1.3. Estimación de la PPN _{total} en las plantaciones forestales en las regiones del Biobío y Ñuble en términos de Exergía para el año 2015.

Para la estimación de la PPN _{total}, se considera la productividad y componentes de la biomasa, tanto del producto principal (PPN _{cosechado}), es decir, corresponde principalmente a los trozos aserriable y trozos pulpa, además, la biomasa y/o residuos por encima del suelo (PPN _{aérea}), la biomasa y/o residuos por abajo del suelo específicamente las raíces (PPN _{subterránea}) y por último, la biomasa perdida por motivos de incendios o plaga (PPN _{pérdida}). Mediante a la metodología propuesta por (Haberl, Erb, & Krausmann, 2014; Haberl et al., 2007). Para este caso de estudio la PPN _{total} se determinara mediante la siguiente ecuación:

$$PPN_{total} = PPN_{aérea} + PPN_{subterránea} + PPN_{pérdida} \quad (1)$$

Donde,

PPN _{total}: La Producción Primaria Neta total en gramos de carbono por metro cuadrado por año, en adelante g C/m²*año, corresponde a la biomasa total existente, tanto como la biomasa aérea, subterránea, además en algunas ocasiones la biomasa pérdida por conceptos de incendios forestales o plagas.

PPN _{aérea}: La Producción Primaria Neta aérea en g C/m²*año, corresponde a toda la vegetación viva que se encuentra encima del suelo, la biomasa de las plantaciones forestales incluidos tallos, cepas, semillas y follaje.

PPN _{subterránea}: La Producción Primaria Neta subterránea en g C/m²*año, se refiere principalmente a la contribución de la biomasa proveniente de las raíces. Vegetación abajo del suelo.

PPN _{pérdida}: La Producción Primaria Neta pérdida en g C/m²*año, se refiere a las pérdidas de biomasa por conceptos de plagas e incendios en las plantaciones forestales.

En cuanto a la componente PPN _{aérea} se puede descomponer su estimación en los subcomponentes dado por la siguiente ecuación:

$$PPN \text{ aérea} = PPN \text{ cosechado} + PPN \text{ residuos} + PPN \text{ remanente} \quad (2)$$

Donde,

PPN _{cosechada}: La Producción Primaria Neta cosechada en g C/m²*año, es la parte cosechada con fines económicos tales como es el caso de los trozos aserriable o pulpable. Denominado producto principal para este estudio.

PPN _{residuos}: La Producción Primaria Neta residuos en g C/m²*año posterior a un manejo forestal, es la biomasa residual del producto principal, es el caso de las ramas residuales después de una poda, raleo y cosecha final.

PPN _{remanente}: La Producción Primaria Neta remanente en g C/m²*año, es la biomasa restante después de la extracción de la biomasa del producto principal y residuales post manejo forestal, esta biomasa corresponde a la maleza en una plantación forestal, frutos, cepas, vegetación de tamaño pequeñas, etc.

Por lo tanto, reemplazando la ecuación (2) en (1), la PPN _{total} se determina de la siguiente forma:

$$PPN \text{ total} = PPN \text{ cosecha} + PPN \text{ residuo} + PPN \text{ remanete} + PPN \text{ subterránea} + PPN \text{ pérdida} \quad (3)$$

La biomasa pérdida es aquella que se pierde por efectos de un incendio forestal o plagas. Para este caso de estudio no se considerará el componente PPN_{pérdida}, debido que la mayor parte de la información está en relación base a una hectárea de plantación forestal establecida, además en términos de biomasa en caso de incendio se considera que se pierde la biomasa en su totalidad.

4.1.3.1. Estimación de la subcomponente PPN_{aérea} y PPN_{subterránea}.

Recordando la ecuación (1) los componentes PPN_{aérea} y PPN_{subterránea} corresponden a la biomasa y/o residuos aéreos y subterráneos. Para la estimación de estos subcomponentes se utilizará la ecuación planteada por Salazar, 2019. Salazar propone la siguiente ecuación para la estimación de los subcomponentes PPN_{aérea} y PPN_{subterránea} en suelos de plantaciones forestales:

$$G_{as} = IMA * BCEF \cdot (1 + R) * CF \quad (4)$$

Donde,

G_{as}: Reserva de carbono de biomasa aérea y subterránea en toneladas de carbono por hectárea por año (t C/ha*año).

IMA: El parámetro IMA representa el Incremento Medio Anual; es el crecimiento acumulado relacionado con la edad de un bosque, expresado en (m³/ha*año). Los valores del IMA son diferentes para las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* fueron extraídos del informe técnico “Disponibilidad de madera de plantaciones de pino radiata y eucalipto (2010-2040)” (INFOR-MINAGRI, 2013).

R: Relación de la biomasa aérea/subterránea, es un parámetro adimensional. En el caso de las plantaciones forestales este parámetro cambia en función de la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. Los valores para cada especie de plantación forestal fueron extraídos (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

CF: Fracción de Carbono de materia seca en (t C/tms), para el caso de las dos especies de plantación forestales *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* se considera

el valor 0.47 (t C/tms). Estudios previos consideran estos valores de CF (Ministerio del Medio Ambiente, 2017).

BCEFí: Es el factor conversión y expansión de biomasa en unidades de toneladas en volumen (t/m³); estudios previos de Conaf cálculo la variable mediante la siguiente ecuación:

$$BCEFí = BEF * DB \quad (5)$$

Donde,

BEF: Factor de expansión de biomasa adimensional. Su valor cambia dependiendo del uso del suelo y tipo de especie. Se utiliza este parámetro para expandir el volumen comercial de los árboles al volumen total de la biomasa aérea

DB: Densidad básica expresado en tms/m³. Es el peso seco presente en un volumen dado cuando se encuentra verde, con un contenido de humedad igual o mayor al punto de saturación de las fibras (equivalente al 30%). Esta propiedad depende del tipo de especie *Pinus radiata* 0.39 tms/m³ y para la especies *Eucalyptus globulus* el valor de 0.53 tms/m³.

Tabla 4. Valores utilizados para la estimación de la PPN aérea y PPN subterránea clasificada según cada especie de plantación forestal.

Componente	Unidad	<i>Pinus radiata</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
<i>DB</i>	tms/m ³	0,39	0,53
<i>CF</i>	t C/tms	0,47	0,47
<i>IMA</i>	m ³ /ha*año	21	22,75
<i>R</i>	adimensional	0,25	0,22
<i>BEF</i>	adimensional	1,54	1,77

Fuente: Elaboración propia en base del Inventario de Gases de Efecto Invernadero de Chile serie 1990-2013 (Ministerio del Medio Ambiente, 2017), Anuario Forestal 2016 (INFOR, 2017) y Disponibilidad de madera de plantaciones de pino radiata y eucalipto (2010-2040) (INFOR-MINAGRI, 2013).

Desde la ecuación (4) se puede calcular la PPN _{subterránea}, desde la componente R (relación de la biomasa aérea y subterránea), una vez obtenido el valor de $G_{a s}$, se puede obtener el valor de la biomasa subterránea (Biomasa _{sub}) de la siguiente forma:

$$Biomasa\ sub = G\ a\ s * 0.25 \quad (6)$$

Además, se puede calcular la biomasa aérea (Biomasa _{aérea}) desde la componente R, de la siguiente manera:

$$Biomasa\ aérea = G\ a\ s * 0.75 \quad (7)$$

Si bien con la ecuación (4) de la estimación de la biomasa aérea y subterránea, se debe recordar que el resultado de la Biomasa _{aérea} contempla la biomasa cosechada, residual y remanente, estos subcomponentes se puede determinar de la siguiente forma para cada tipo de especie de plantación forestal.

4.1.3.2. Estimación de la subcomponente PPN _{aérea}.

La PPN _{aérea} se divide en tres subcomponentes, PPN _{cosechado}, PPN _{residuo} y PPN _{remanente}. A continuación, se describe el cálculo de cada subcomponente y para especie de plantación forestal en forma independiente ya que existe diferencias respecto a la información recopilada por parte las medianas empresas.

Para estimar la PPN _{aérea} se realizó dos entrevistas cualitativas a diferentes empresas, una de rubro especificado en *Pinus radiata* y a otra empresa especificada en el rubro de *Eucalyptus globulus* para la obtención de la información sobre el manejo forestal aplicado, además, se complementara con información bibliográficas de Conaf, Infor, etc. Las entrevistas permiten visualizar los diferentes manejos forestales e identificar los componentes a considerar en la estimación en cada

subcomponente de la PPN aérea. A continuación en las siguientes figuras 7 y 8 se describen los rendimientos de las biomazas calculadas y consideraciones para cada especie de plantación forestal.

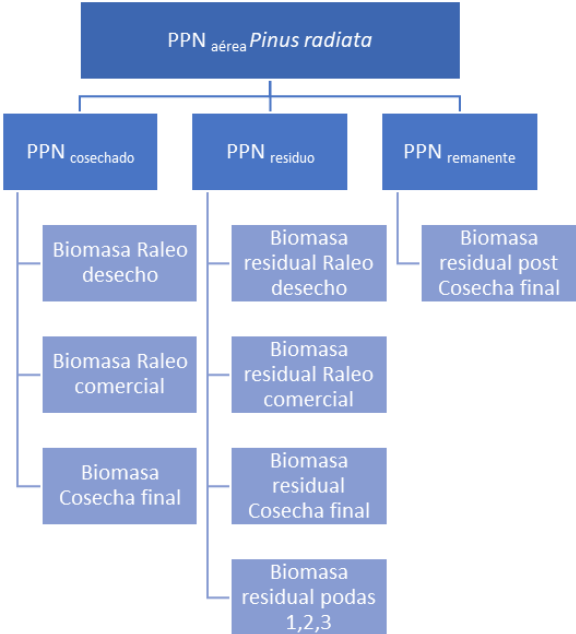


Figura 7. Biomasa calculadas y considerada para cada subcomponente de la PPN aérea para la especie *Pinus radiata*.

Fuente: Elaboración propia en base a entrevista empresa rubro *Pinus radiata*.

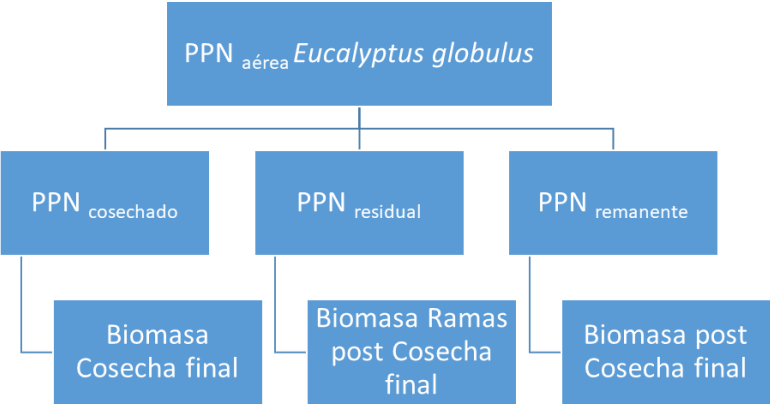


Figura 8. Biomasa considerada y calculada para cada subcomponente de la PPN aérea para la especie *Eucalyptus globulus*.

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

Para la estimación de la PPN cosechada se utilizó la siguiente ecuación:

$$G_{co} = Vc * DB * CF \quad (8)$$

Donde,

G_{co} : Reserva de carbono de la biomasa cosechada en unidades de tonelada de carbono cosechado en un volumen de materia seca cosechado por superficie de 1 hectárea en un periodo de tiempo t C/ha*año. Si bien donde se obtiene más biomasa es en la cosecha final, también se debe considerar los raleos desecho y raleo comercial, donde se extrae biomasa.

Vc : Volumen cosechado en m^3 para una hectárea de plantación de *Pinus radiata* en la antigua región del Biobío extraído de la entrevista a empresa pertinente este valor corresponde a un promedio de volumen de un bosque de pino en un periodo de cosecha de 21 años, anexo 3. En el caso de la especie *Pinus radiata* para estimar el volumen cosechado de los trozos de madera (tronco de madera sin ramas) cosecha final, para los raleos, se utilizara el método de escala JAS, escala Japonesa Agrícola Estándar, esta fue desarrollada para medir troncos de madera a finales de los años 1940 y se hizo popular en el este de Asia, Oceanía y en Chile; se divide en dos escalas según el largo del tronco (Forestal Mininco, 2010). Dado para las siguientes ecuaciones:

1. Para trozos mayores de 6 metros de largo:

$$2. Vc = \left(D * \frac{L''-4}{2} * L * \frac{1}{10.000} \right) \quad (9)$$

Donde,

Vc : Volumen del trozo en (m^3).

D : Diámetro de la punta en trozo en (cms).

L : Largo nominal del trozo (no incluye sobredimensión) en (m).

L'' : Largo nominal del trozo sin decimales en (m).

En la siguiente tabla 5 detalla las dimensiones de la especie *Pinus radiata* que se consideraron para el cálculo de la PPN cosechado. Se debe considerar que los parámetros como la altura y el diámetro fueron considerados un promedio aproximado. Posteriormente el volumen de 1 trozo debe ser multiplicado por la cantidad de trozos cosechados en una hectárea de *Pinus radiata*.

Tabla 5. Parámetros para el cálculo de la PPN cosechado para la especie *Pinus radiata*.

<i>Parámetros</i>	<i>Raleo Desecho</i>	<i>Raleo Comercial</i>	<i>Cosecha final</i>
<i>Pinos talados por (ha)</i>	300	275	425
<i>Edad de la plantación (años)</i>	4	10	21
<i>Altura del pino en (mts)</i>	11	17.5	30
<i>Diámetro de la punta del trozo en (cm)</i>	7	14	25
<i>Volumen en (m³)</i>	8,085	43,79	414,375

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Pinus radiata*.

En el caso de la especie *Eucalyptus globulus*, el volumen cosechado del trozo se realizará en función del volumen entregado por la empresa del rubro *Eucalyptus globulus*, en esta se informa un rendimiento promedio de 295 m³ para una hectárea de plantación de *Eucalyptus globulus*, edad de la cosecha de la plantación a los 14 años, anexo 4. Además el manejo forestal en dicha especie, en general no presenta realización de raleos ni podas. No se aplicará el método a escala JAS ya que no cuenta con el detalla de los parámetros alturas y diámetro de los *Eucalyptus globulus*. La tabla 6 detalla los parámetros consideraros para la estimación de la PPN cosechado.

Tabla 6. Parámetros para el cálculo de la PPN cosechado para la especie *Eucalyptus globulus*.

<i>Parámetros</i>	<i>Cosecha final</i>
<i>Eucaliptus talados por (ha)</i>	1266
<i>Edad de la plantación (años)</i>	14
<i>Volumen en (m³)</i>	295

Fuente: Elaboración propia en base entrevista rubro *Eucalyptus globulus*.

Una vez obtenidos los volúmenes de cosecha para una hectárea de plantación establecida de cada especie, es necesario realizar una conversión de unidades, para ello el volumen en m³ debe ser multiplicado por el parámetro DB (densidad básica) expresado en tms/m³ y luego por el parámetro CF (fracción de carbono de materia seca) en t C/tms, ambos parámetros descritos en la tabla 4. Luego los volúmenes deben ser estandarizados por año, para esto se debe dividir por la edad de cosecha de cada plantación, dividir por 21 años para las plantaciones *Pinus radiata* y 14 años para las plantaciones de *Eucalyptus globulus*. Finalmente se obtendrá el valor de la PPN cosechado en términos de t C/ha*año.

Para la estimación de la PPN residual se utilizó diferentes métodos según la especie de plantación forestal; en el caso de la especie *Pinus radiata* por la información obtenida de las entrevistas, donde se detalla las dimensiones largo en metros, diámetro en centímetros y la cantidad de las ramas por pino podadas y/o desechadas en las diferentes etapas del manejo forestal, en la siguiente tabla detalla los parámetros de las ramas de la especie *Pinus radiata*.

Tabla 7. Parámetros para el cálculo de la PPN_{residual} de las ramas para la especie *Pinus radiata*.

Parámetros	Poda 1	Poda 2	Poda 3	Raleo desecho	Raleo comercia	Cosecha final
Edad de plantación	4	6	8	4	10	21
Diámetro menor de la rama [cms]	1	2	4	1	4	5
Largo de la rama [m]	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Cantidad total de rama podadas en 1 ha	10500	8250	4250	11400	6750	12750

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Pinus radiata*.

Los valores de los parámetros de las ramas de la tabla 7, los diámetros de las ramas son correspondientes al diámetro menor en cms de los rangos para cada etapa, para la estimación del volumen de las ramas, el diámetro menor debe ser dividido en 2 para obtener el radio de las ramas, además, se debe realizar una conversión de cms a m del diámetro menor. En el caso del largo de las ramas m es un valor promedio al igual que la cantidad de ramas en cada etapa de manejo forestal de la especie *Pinus radiata*.

Para el cálculo aproximado del volumen de las ramas se hará mediante la fórmula del volumen de un cilindro debido a que las ramas de un pino es parecido a una forma cilíndrica. La fórmula del volumen de un cilindro se expresa de la siguiente forma:

$$V \text{ ramas: } (\pi * r^2 * h) * \text{números de ramas por pino (10)}$$

Donde,

V ramas: Corresponde al volumen m³ de las ramas por hectáreas en cada etapa del manejo forestal, podas, raleos y cosecha final.

π : constante matemática (pi).

r: radio de una circunferencia en m, corresponde a la mitad del diámetro.

h: corresponde al largo de la rama en m.

Una vez obtenidos el valor de los volúmenes de las ramas m^3 , es necesario estandarizar este valor a unidades de tonelada de carbono residual en un volumen de materia seca por una superficie en un periodo de tiempo t C/ha*año. Para esto el volumen m^3 debe ser multiplicado por el parámetro DB 0.39 tms/ m^3 , además, debe ser multiplicado por el parámetro CF 0.47 t C/tms. Luego los volúmenes deben ser estandarizados por 21 años, en el caso de la especie *Pinus radiata*.

El cálculo de la PPN _{remanente} de la especie *Pinus radiata* se calculará desde la formula (2) quedando la siguiente ecuación:

$$PPN \text{ remanente} = PPN \text{ aérea} - PPN \text{ cosechado} - PPN \text{ residuos} \quad (11)$$

En el caso del *Eucalyptus globulus* no se cuenta con la información detallada con los diámetros de las ramas cms, largo m y cantidad de ramas podadas y/o desechadas. Entonces la PPN _{residual} de la especie mencionada anteriormente se considerara que la PPN _{residual} sumado con la PPN _{remanente} es igual a la PPN _{aérea} menos la PPN _{cosechado}, por lo tanto la PPN _{remanente} y PPN _{residual}, se puede calcular desde el despeje de la formula (2) quedando la siguiente formula:

$$PPN \text{ residuos} + PPN \text{ remanente} = PPN \text{ aérea} - PPN \text{ cosechado} \quad (12)$$

Para finalizar el cálculo de la PPN _{aérea} y sus subcomponentes PPN _{cosechado}, PPN _{residual} y PPN _{remanente} en unidades de t C/ha*año, es necesario realizar una conversión de unidades, para poder utilizar el factor de conversión de Exergía, por ende las toneladas de carbono se deben convertir a kilogramos de carbono y la hectárea de plantación establecida a metros cuadrados. La conversión de unidades se realizara de la siguiente forma:

$$PPN \text{ aérea} \frac{t \text{ C}}{ha \text{ año}} \times \frac{1 \text{ ha}}{10000 \text{ m}^2} \times \frac{1000 \text{ kg C}}{1 \text{ t C}} = PPN \text{ aérea} \left(\frac{kg \text{ C}}{\text{m}^2 \text{ año}} \right) \quad (13)$$

4.1.3.4. PPN_{total} en términos de Exergía.

Ya obtenido el valor de la PPN_{total} para poder expresarlo en términos de Exergía se debe realizar una conversión con el factor de conversión determinado por Alvarenga,2013 (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013b). Cuyo factor de conversión es 42,9 MJex/ Kg C, finalmente la PPN_{total} en términos de Exergía queda expresado de la siguiente forma:

$$PPN \left[\frac{Kg C}{m^2 * año} \right] \times 42.9 \left[\frac{MJex}{Kg C} \right] = PPN \left[\frac{MJex}{m^2 * año} \right] \quad (14)$$

4.2. Realizar inventario de los Recursos No Locales y manejo forestal en las plantaciones forestales para las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de MJex/m²*año.

4.2.1. Aplicar la metodología Análisis de Ciclo de vida (ACV), en los manejos forestales para la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Siguiendo las directrices de la metodología ACV, se cuantificaron todas las entradas y salidas de los sistemas forestales. Para ello se consideraron los límites del sistema desde “la cuna a la puerta” excluyendo la etapa del transporte de la biomasa una vez cosechada y el transporte del personal trabajador. Recordando este estudio estimara la eficiencia del uso del suelo en una hectárea de plantación forestal para especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus*, en cuanto a los límites del ACV, la cuna comienza desde la preparación del suelo para la plantación de las especies forestales, se excluye la etapa de preparación de la plántula del vivero y en cuanto a la puerta del sistema, se considerara el limite final a los trozos de la cosecha arrumados al interior del predio.

Se tomará como unidad funcional 1 hectáreas ha de superficie plantada, lo que significa que todos los RNL cuantificados y los rendimientos de biomasa serán en base a dicha unidad funcional.

También se excluirán la cadena de producción de cada RNL utilizados durante el manejo forestal; tales como, la producción del combustible fósil, la producción de los herbicidas, fertilizante, entre otros.

En la figura 9 se describen las etapas consideradas en los límites de ACV para ambas especies de plantaciones forestales.

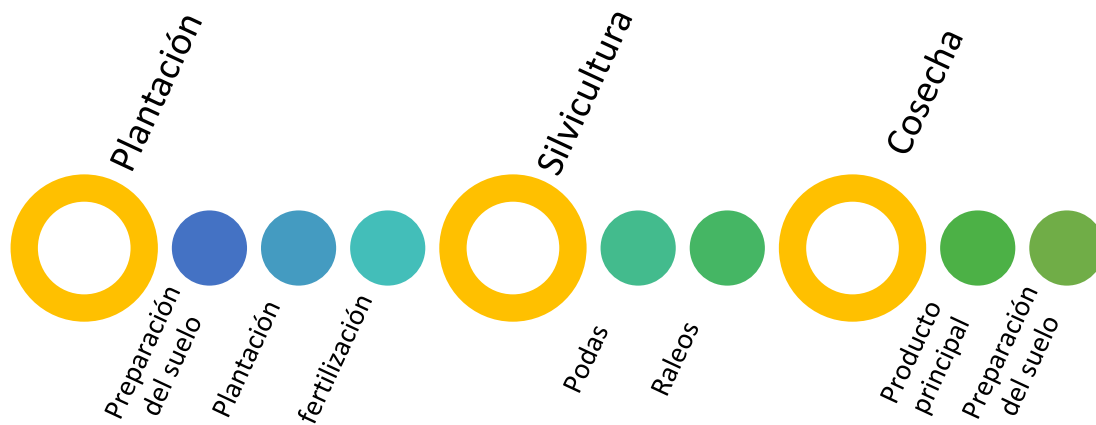


Figura 9. Esquemas del límite del sistema para las plantaciones forestales *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Fuente: Elaboración propia en base estudio de “caracterización de la cadena de producción y comercialización de la industria forestal: estructura, agentes y prácticas” (Ministerio del Agricultura, 2016).

Desde la figura 9 se define:

- **Plantación:** Consiste en la preparación del suelo para la posterior plantación de plántula mediante un subsolado o arado. En esta etapa se establecen las plántulas seleccionadas en el terreno previamente preparado, luego de realizar la plantación se aplican los nutrientes para apoyar el crecimiento de la planta.

En el caso de la especie *Eucalyptus globulus* es importante aplicar fósforo para el crecimiento en la fase inicial (INFOR, 2015; Ministerio del Agricultura, 2016). El control de la maleza no deseada es una actividad crítica en el

establecimiento de una plantación forestal, que asegura el desarrollo óptimo de la especie objetivo *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, además el control de maleza ayuda a la sobrevivencia de la plántula, junto con disminuir el riesgo de incendios forestales (Arauco, 2012).

- **Silvicultura:** la etapa de silvicultura son las actividades generalmente de forma manual para mejorar la productividad de la plantación. Una vez que los árboles cumplen entre 4 y 5 años, se inicia el manejo forestal de podas y raleo, estas etapas son decisivas para mejorar y cuidar la calidad de la madera (Ministerio del Agricultura, 2016).

Las podas consisten en la eliminación parcial de las ramas inferiores de los árboles y con su aplicación se asegura la obtención de madera libre de nudos fuera del centro del tronco (Ministerio del Agricultura, 2016).

Los raleos consisten en extracción de los árboles defectuosos o con crecimientos deficientes, o limitar la cantidad de árboles por ha y se realiza con la finalidad de mejorar la provisión de los nutrientes del suelo. La etapa de silvicultura posibilita que se obtengan árboles sanos, con troncos de mayor diámetros y de mejor forma (Ministerio del Agricultura, 2016).

- **Cosecha:** Consiste en el aprovechamiento de la plantación cuando ha alcanzado sus niveles ideales de crecimiento y calidad. Como producto principal se obtiene trozo con corteza, ya sea para ser aseriada o pulpable. El grosor del tronco y altura del árbol cosechado depende de los años transcurrido desde la plantación de la plántula hasta su cosecha idónea. Dicho tiempo puede variar según el destino final del tronco.

Según el informe de plantaciones forestales efectuadas durante el año 2015 de Conaf (Conaf, 2016). Describe que para la antigua región del Biobío el 78,5% de la superficie cosechada de *Pinus radiata* se encuentra en las edades de cosecha de 19 a 21 años; 46,6% corresponde al rango de 22 a 24 años. Para el caso de la superficie cosechada de *Eucalyptus globulus* un 45,9% corresponde al rango de 10 a 12 años, seguido de un 42,1% a las

cosechas efectuadas entre los 13 a 15 años (INFOR, 2015). Una vez cosechado se considerara la preparación del suelo específicamente la hechura de fajas mecanizadas para una posterior replantación.

4.2.2 Identificación de los Recursos No Locales (RNL), en los manejos forestal para la especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Los Recursos No Locales (RNL) corresponden a los recursos, insumos y tecnologías que permiten maximizar el rendimiento cuantitativo y cualitativo de una plantación. En la siguiente lista se describe los RNL usados en las plantaciones forestales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*. Se excluirá la categoría ocupación de suelo para evitar un doble conteo de los valores obtenidos en la PPN_{potencial} (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

Listado de los RNL en las plantaciones forestales *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, según las entrevistas a las empresas especialidad en cada especie:

- 1.- Maquinarias utilizadas para la preparación del suelo, control de malezas, etc.
- 2.- Uso de plantas originadas en semillas de viveros.
- 3.- Fertilizantes y herbicidas.
- 4.- Combustibles fósiles.
- 5.- Recursos hídricos.

En las siguientes tablas se resumirá las principales diferencias entre los manejos forestales para la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Tabla 8. Descripción de los RNL en el manejo forestal para la especie *Pinus radiata*, en relación a una hectárea de plantación establecida:

<i>Etapas del manejo forestal</i>		<i>Edad de la plantación</i>	<i>Pinus radiata</i>	
Plantación	Preparación del suelo	Control de maleza	Mes 1	3.5 Lt Glifosato
	Plantación	Plantación de plántula	Mes 2	1000 plántula
	Fertilización	Fertilización	Mes 2	30 kg Boro calcita granulado
		Control de maleza	Mes 4	1.3 Lt Glifosato
			Mes 24	1.3 Lt Glifosato
Silvicultura	Podas	Poda 1	Mes 48	700 pinos podados
		Poda 2	Mes 72	550 pinos podados
		Poda 3	Mes 84	425 pinos podados
	Raleos	Raleo desecho	Mes 60	300 pinos talados
		Raleo comercial	Mes 120	275 pinos talados
Cosecha		Cosecha final	Mes 252	475 pinos talados

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Pinus radiata*.

Tabla 9. Descripción de los RNL en el manejo forestal para la especie *Eucalyptus globulus*, en relación a una hectárea de plantación establecida:

Etapa del manejo forestal			Edad de la plantación	<i>Eucalyptus globulus</i>
Plantación	Preparación del suelo	Control de maleza	Mes 1	3 kg Raundap, 3 Kg Simazina, 50 cc Silwet, 0.3 Kg Aliado forestal
	Plantación	Plantación de plántula	Mes 2	1333 plántula
	Fertilización	Fertilización	Mes 2	39.99 Kg Forestkote
		Control de maleza	Mes 4 Mes 10	3 kg Raundap, 50 cc Silwet, 0.3 Kg Aliado forestal
Silvicultura	Podas	No Aplica		
	Raleos	No Aplica		
Cosecha	Cosecha	Cosecha Final	Mes 168	1266 eucaliptus talados

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

Tabla 10. Descripción de los RNL utilizados en las maquinarias y el transporte al interior del predio para la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, en relación a una hectárea de plantación establecida:

Etapa del manejo forestal			Maquinaria o herramienta	<i>Pinus radiata</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
Plantación	Preparación del suelo	Limpieza del terreno	Motosierra	30 Lt Bencina 93	30 Lt Bencina 93
		Fajas mecanizadas	Retroexcavadora	60 Lt Diésel	60 Lt Diésel
	Plantación	Transporte plántula	Camioneta 4x4	5 Lt Diésel	8 Lt Diésel
	Fertilización	Transporte fertilizante	Camioneta 4x4	5 Lt Diésel	5 Lt Diésel
		Control de maleza	Pulverizador Manual	No aplica	No aplica
Silvicultura	Raleo	Tala en raleo desecho	Motosierra	2,7 Lt Bencina 93	No aplica
		Tala en raleo comercial	Motosierra	6 Lt Bencina 93	No aplica
		Arrumado en cancha	Tractor	20 Lt Diésel	No aplica
	Bell		32 Lt Diésel	No aplica	
	Poda	Podas	Tijerón poda	No aplica	No aplica
Cosecha	Cosecha	Tala en cosecha	Motosierra	75 Lt Bencina 93	30 Lt Bencina 93
		Arrumado en cancha	Tractor	140 Lt Diésel	No aplica
			Bell	80 Lt Diésel	No aplica
		Skkider	No aplica	200 Lt Diésel	
	Preparación del suelo	Faja mecanizada	Retroexcavadora	60 Lt Diésel	60 Lt Diésel

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresas rubro *Pinus radiata* y empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

De la tabla 10. El consumo de bencina 93 octanajes corresponde al uso de la herramienta motosierra de motor 2T convencional que debe ser mezclado con un aceite de mezcla en una proporción: 1 litro de bencina con 250 cc de aceite de mezcla aditivo para proteger el motor, además, se debe ocupar aceite de cadena en la proporción: 1 litro de bencina por medio litro de aceite de cadena para su lubricación. En este caso se ocupará el mismo aceite de mezcla y aceite de cadena para las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, descrito en la siguiente tabla 11.

Tabla 11. Otros RNL para la herramienta motosierra en faenas silvícola, en relación a 1 hectárea de plantación establecida para la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Especie	Consumo total Bencina 93	Consumo total Aceite de mezcla	Consumo total Aceite de cadena biodegradable
<i>Pinus radiata</i>	113,7 litros	28,425 litros	56,85 litros
<i>Eucalyptus globulus</i>	60 litros	15 litros	30 litros

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Pinus radiata* y empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

4.2.3. Aplicar el método CExD de los RNL para convertirlos en términos de Exergía.

Una vez finalizado los inventarios de los Recurso No Locales (RNL), estos deben ser estandarizados en términos de Exergía, para ello se debe contabilizaran los RNL mediante el método Demanda Acumulada de Exergía (CExD) extraídos desde la base de datos Ecoinvent; base de dato más utilizada para la evaluación de ACV, debido a sus datos consistente y transparente (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

Posteriormente con el software Simapro se obtuvieron la extracción Acumulada de Exergía desde el Entorno Natural (CEENE) (J Dewulf et al., 2007). Además de evaluar todo tipo de recursos con una unidad de medida estandarizada y diferencia espacial. En la tabla 14. Se describen los valores Exergéticos de los RNL obtenidos por el método CExD.

Tabla 12. CExD en [MJex/Kg] para cada RNL en relación a una hectárea de plantación establecida de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

RECURSO NO LOCAL (RNL)	COMBUSTIBLE FÓSIL	RECURSOS RENOVABLES ^A	RECURSO AGUA	RECURSO METALES Y MINERALES	RECURSOS NO RENOVABLES ^B	TOTAL [MJ EX/KG]
DIÉSEL	61,712	3,297	0,747	0.080	-0,716	65,12
GASOLINA 93	59,013	2,031	0,590	-0,009	-0,449	61,176
ACEITE MEZCLA DE 2 TIEMPO	72,855	1,942	0,535	0,629	-0,708	75,253
ACEITE PARA CADENA	72,85	1,942	0,535	0,629	-0,708	75,253
GLIFOSATO	170,538	12,033	-14,707	25,494	8,198	201,556
BORO CALCITA GRANULADO	10,370	0,021	0,025	0,005	0,125	10,546
FORESTKOT E	46,583	-3,155	1,401	1,539	-8,945	37,423
RAUNDAP	171,742	7,007	-13,069	6,163	2,978	174,821
SIMAZINA	171,742	7,007	-13,069	6,163	2,978	174,821
ALIADO FORESTAL	171,742	7,007	-13,069	6,163	2,978	174,821
SILWET	171,742	7,007	-13,069	6,163	2,978	174,821

^a Considera energía cinética, potencial, solar y biomasa

^b Considera energía nuclear y primaria

Fuentes: Elaboración propia en base CExD V1.05 del software Simapro, comparación de evaluación de impacto.

Consideraciones de la tabla 12. Para los herbicidas Raundap, Simazina, Aliado forestal y Silwet, al momento de usar el método CExD se utilizó la categoría

pesticida no especificado para cada herbicida mencionado anteriormente. Para el caso del fertilizante Forestkote se ocupó la categoría de fertilizante de sulfato de amonio. Para los aceites de mezcla de dos tiempos y aceite de cadena se utilizó la categoría aceite lubricante. Los RNL no mencionados anteriormente fueron ingresados con el nombre de sus productos sin considerar modificaciones.

Los valores totales de cada RNL serán multiplicados por la cantidad de RNL ocupados para cada manejo forestal de la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, en base a una hectárea de plantación establecida, cuyas cantidades son obtenidos de los inventarios de los RNL de cada especie ya estandarizados en Kg/m²*año.

4.3. Evaluar la eficiencia del uso del suelo como recurso en las plantaciones forestales de las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* mediante el indicador Producción Neta anual de Exergía $\Delta NExP$.

Una vez obtenidas la PPN_{potencial}, la PPN_{total} y los RNL en términos de Exergía, se procederá a aplicar el indicador de Producción Neta anual de Exergía, normalizado por un año de producción para las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, determinado por el indicador de balance Exergético $\Delta NExP$ (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013):

$$\Delta NExP = PPN_{total} - (RNL + PPN_{potencial}) \quad (15)$$

Donde sí,

$\Delta NExP \leq 0$ MJex/m²*año: La producción de las plantaciones forestales no es eficiente, esta situación se puede dar por los siguientes escenarios:

- La productividad de las plantaciones forestales es menor a la PPN_{potencial} del suelo.
- Utilización inadecuada de los Recurso No Locales y/o manejo forestal no adecuado.

$\Delta\text{NExP} \leq 0 \text{ MJex/m}^2 \cdot \text{año}$: La producción de las plantaciones forestales es eficiente, esta situación se puede dar por los siguientes escenarios:

- La PPN_{total} es mayor que la PPN_{potencial}.
- Utilización adecuada de los RNL y/o manejo forestal óptimo.

Es importante destacar que este indicador de ΔNExP tiene un punto de vista de la producción de los recursos; si bien algunos sistemas creados por el humano parecen ser más eficientes que los sistemas naturales, esto no significa que solo generan beneficios, ya que otros servicios ecosistémicos (reguladores, de apoyo y culturales) pueden verse afectados cuando una tierra natural se transforma a un uso diferente de suelo para beneficios del ser humano (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Componentes de la Producción Primaria Neta potencial en términos de Exergía.

En la tabla 13 resume los parámetros máximo, media y mínimo de los valores obtenidos para la PPN potencial para las plantaciones forestales de especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* del área de estudio, obtenido desde la superposición de los mapa de cobertura vegetal del 2015 y el mapa mundial de PPN potencial que provee Alvarenga, 2013 (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013b). Mayor detalles sobre la georreferenciación de la PPN potencial para ambas regiones y ambas especies de plantación forestal disponible anexo 1.

Tabla 13. Parámetros para la PPN potencial para las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de Exergía MJex/m²*año.

Especie	Clasificación	Máximo	Mínimo	Media
Pinus radiata	Plantación			
	Adulta	26,4	19,4	24,0
Eucalyptus globulus	Plantación			
	Adulta	26,3	20,7	24,3

Fuente: Elaboración propia en base Anexo 1, la PPN potencial de las plantaciones forestales en la región del Biobío y Ñuble para el año 2015.

Desde la tabla 13. Se obtiene que la PPN potencial para la especie *Pinus radiata* los valores máximo de Exergía es de 26,4 MJex/m²*año, un valor de mínimo de 19,4 MJex/m²*año y una media de 24 MJex/m²*año. Para la especie *Eucalyptus globulus* los valores obtenidos fueron un máximo de 26,3 MJex/m²*año, un valor mínimo de Exergía de 20,7 MJex/m²*año y una media de 24,3 MJex/m²*año.

Analizando los resultados obtenidos de la tabla 13, se observa que el rango de los valores de la Exergía en las plantaciones de *Pinus radiata* es de 19,4 a 26,4

MJex/m²*año y el rango para la especie *Eucalyptus globulus* es de los valores 20,7 a 26,3 MJex/m²*año, nos refleja que los suelos de las regiones de Biobío y Ñuble que son destinados a uso de plantaciones forestales, dichos suelos son de características naturales del suelo son similares, suelos que brindan el sustento necesario para el crecimiento óptimo de la plantación forestal. Además existe una diferencia estrecha de solo un 1,2% entre la Exergía de la PPN_{potencial} de los suelos destinados para una plantación forestal.

Comparando los valores de Exergía de la PPN_{potencial} para las plantaciones forestales especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* con los valores de la capa de Alvarenga, 2013 (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013b). Se destaca que el valor Exergético de la PPN_{potencial} para Chile es de 14,7 MJex/m²*año, este valor representa promedio de todos los suelos del país Chile pero este valor es inferior a los valores obtenidos para los suelos donde se desarrollan las plantaciones forestales en la región del Biobío y Ñuble. Esto significa, que las características geográficas, climatológicas y geomorfológicas hacen que los valores de la PPN_{potencial} pueden variar significativamente entre regiones o localidades. Lo discutido anteriormente nos indica, que haber usado el valor PPN_{potencial} nacional, se estaría subestimando la entrada de la PPN_{potencial} en el balance al aplicar el indicador ΔNExp. Por lo tanto, esta aproximación en función de la georreferenciación sobre el área del estudio nos permitirá obtener una mayor aproximación en el indicador propuesto.

5.2. Componente de la PPN_{total} en términos de Exergía.

En la figura 10, muestra la Producción Primaria Neta total en términos de Exergía para subcomponente de la PPN_{total} involucrado en la producción y etapas que compromete una plantación forestal. La figura 10, detalla los valor Exergéticos de la PPN_{total} y PPN_{potencial}, tanto para la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, en función a los rendimientos de 1 ha de plantación forestal cosechada e incluyendo las podas y raleos, según el manejo forestal para cada especie estudiada, en términos de Exergía.

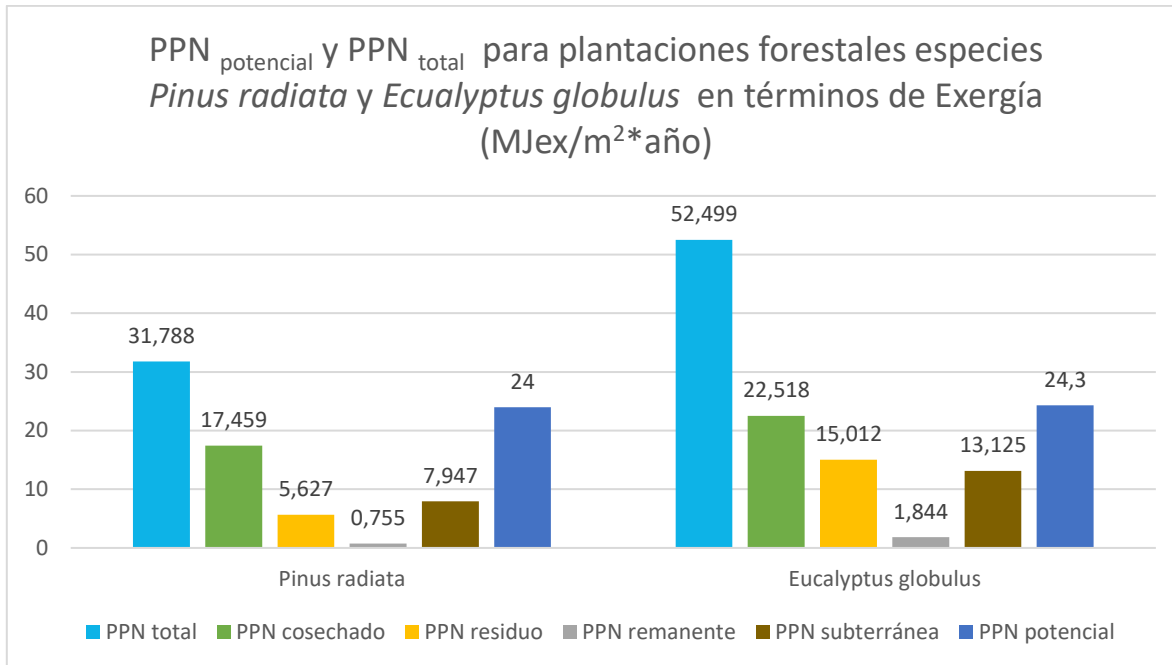


Figura 10. PPN_{potencial} y PPN_{total} para plantaciones forestales especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de Exergía (MJex/m²*año).

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Pinus radiata* y empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

Analizando la figura 10, la especie *Eucalyptus globulus* presenta una mayor cantidad de PPN_{total} 52,499 MJex/m²*año superando a la PPN_{total} de la especie *Pinus radiata* 31,788 MJex/m²*año aproximadamente en 1,6 veces en la biomasa total. Para ambas especies el subcomponente PPN_{cosechado} es quien contiene el valor Exergético más alto respecto a las otras subcomponente de la PPN_{total}. En el caso de la PPN_{cosechado} de la especies *Pinus radiata* representa el 54,92% de la PPN_{total} y en cuanto a la PPN_{cosechado} de la especies *Eucalyptus globulus* esta representa el 42,89% de la PPN_{total}. Es importante indicar, que mientras más alto es el valor Exergético, es mayo la eficiencia productiva del uso del suelo. Sin embargo, para obtener este alto valor de eficiencia se debe ocupar Recursos No

Locales (RNL) y eficientes técnicas de manejo forestal que influyen en la biomasa total producida.

La PPN cosechado de la especie *Eucalyptus globulus* es aproximadamente 1,29 veces superior a la PPN cosechado de la especie *Pinus radiata*. Este comportamiento está directamente relacionado con las características, manejos y rendimiento forestal de cada especie. En este caso particular, el rendimiento de cosecha del *Eucalyptus globulus* de 295 m³ en un periodo de cosecha de 14 años, mientras el rendimiento de cosecha junto a los raleos de la especie *Pinus radiata* es de 466,25 m³ en un periodo de cosecha de 21 años, al momento de estandarizar por los años de cosecha el rendimiento para el *Eucalyptus globulus* es de 21,07 m³ mientras tanto para el *Pinus radiata* es de 22,20 m³. Sin embargo, teniendo las especies un rendimiento estandarizado similar, el valor IMA (incremento medio anual) juega un papel fundamental en la obtención de biomasa, siendo 22,75 m³/ha*año para la especie *Eucalyptus globulus* y un valor de IMA de 21 m³/ha*año del *Pinus radiata*, esto significa, que la especie de *Eucalyptus globulus* es una especie de más rápido crecimiento cuando se compara con el *Pinus radiata* es por ello que para la misma unidad funcional 1 m³ de superficie se obtenga mayores cantidades de biomasa.

Existen miles de especies forestales en todo el mundo, pero solo 30 especies se destinan para producción de madera u otros productos, las especies plantadas con mayor superficie en climas templados predominan las de especies de pino, eucalipto y álamo. La especie *Pinus radiata* se adaptó favorablemente a las condiciones climáticas y las condiciones naturales de los suelos. Desde el año 1974 el gobierno de Chile reconoce el sector forestal como estratégico en el desarrollo económico del país específicamente con la apertura del comercio exterior, con la dictación del Decreto Ley n°701 como fomento forestal orientado a la protección, incremento, manejo racional y fomento de las actividades forestales, el gobierno Chileno contribuyó con un aporte de bonificación del 75% de los costos netos de la forestación incluyendo también las actividades del manejo (Prado D., 2015).

A nivel mundial, aproximadamente el 70 % de los bosque que se planta son con fines productivos (Prado D., 2015). El manejo forestal contribuye con los tratamientos o intervenciones silvícolas, que se aplican en una plantación forestal con el objetivo de mejorar su estado productivo o para obtener un producto comercial en mediano y largo plazo, además de aumentar su valor, mediante la realización de podas y raleos (Conaf, 2013). Siguiendo con el análisis de los diferentes manejos presentados en este estudio para cada especie, un factor influyente en la biomasa cosechada obtenida es el periodo de cosecha, 21 años para la especie *Pinus radiata* y 14 años para la especie *Eucalyptus globulus*, donde la especie eucaliptos a pesar de tener un periodo de cosecha más temprano, se logra obtener aproximadamente 71% de la biomasa cosechada de la especie *Pinus radiata*, con un volumen de 295 m³ para la especie *Eucalyptus globulus* y 414,38 m³ de la especies *Pinus radiata*, estos porcentaje calculado según los valores obtenidos de las entrevista de cada rubro.

La subcomponente PPN_{subterránea} en el caso de la especie *Pinus radiata* corresponde a la segunda subcomponente que aporta mayor valor Exergético de la PPN_{total}, en el caso de la especie *Eucalyptus globulus* corresponde a la tercera subcomponente que más valor Exergético que aporta a la PPN_{total}. Podemos notar que nuevamente la especie *Eucalyptus globulus* supera aproximadamente 1,6 veces a la PPN_{subterránea} de la especie *Pinus radiata*. Este resultado se puede justificar por los mayores rendimientos de cosecha de la especie *Eucalyptus globulus* versus al *Pinus radiata* según lo explicado anteriormente, a pesar de que la relación de la biomasa aérea y subterránea (R) para el *Eucalyptus globulus* 0,22 sea menor que el valor R de la especie *Pinus radiata* 0,25.

Siguiendo con la subcomponente PPN_{residuo} para la especie *Pinus radiata* aporta un valor Exergético correspondiente al 17,7% de la PPN_{total} y en el caso de la especie *Eucalyptus globulus* aporta el 28,58%. En cuanto a los valores Exergético de la PPN_{residuo} para la especie *Pinus radiata* corresponde a 5,627 MJex/m²*año mientras que para la especie *Eucalyptus globulus* corresponde a 15,012 MJex/m²*año, siendo mayor para la especie ultima esto puede ser debido al manejo forestal de

cada especie. Recordando la subcomponente PPN_{residuo} del *Eucalyptus globulus* corresponde a las ramas totales sin intervención de podas, ni raleos, esta conducta influye que se obtenga una mayor biomasa residual ya que el caso de la especie *Pinus radiata* los raleos aplicados disminuyen la cantidad de pinos cosechados, además las podas aplicadas mejoran la calidad del tronco libre de nudo pero tenemos una menor cantidad o controlada de ramas por pino. Otro factor pudo influir el valor alto de la PPN_{residual} de la especie *Eucalyptus globulus* es la forma que se calculó dicha subcomponente debido a la falta de datos de la entrevista, el cálculo se hizo de la siguiente forma la PPN_{aérea} corresponde a la suma de las subcomponente PPN_{cosecha}, PPN_{residuo} y PPN_{remanente}. Entonces la diferencia entre la PPN_{aérea} - la PPN_{cosecha} corresponde a la suma de la PPN_{residual} + PPN_{remanente}, además se consideró que la PPN_{residuo} corresponde al 40% de la biomasa del eucalipto ya que el 60% corresponde a la biomasa de la troza (producto principal). Con esta consideración el valor de la PPN_{residuo} para la especie *Eucalyptus globulus* es de 15,012 MJex/m²*año esta consideración puede afectar el valor de esta subcomponente PPN_{residuo}. A continuación los valores en términos de Exergía para la PPN_{aérea} y PPN_{subterránea}

Tabla 14. Valores en términos de exergía MJex/m²año para la PPN_{aérea} y PPN_{subterránea} para las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, en relación a 1 m² de plantación establecida.

	PPN aéreo			PPN subterránea	PPN total [MJex/m²*año]
	PPN	PPN	PPN		
	cosecha	residuo	remanente		
<i>Pinus radiata</i>	17,459	5,627	0,755	7,947	31,788
<i>Eucalyptus globulus</i>	22,518	15,012	1,844	13,125	52,498

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Pinus radiata* y empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

5.3. Análisis de los Recursos no locales para la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de Exergía MJex/m²*año.

Como se mencionó previamente el manejo forestal juega un papel importante en el incremento de los rendimientos de biomasa para cada especie forestal estudiada. Esto implica que se requiera recursos adicionales a los recursos naturales (PPN potencial) para obtener los rendimientos forestales requeridos para fines comerciales. Estos recursos adicionales se refieren a los agroquímicos y combustibles usados durante el manejo y cosecha forestal. Los recursos no locales (RNL) fueron seleccionando en 4 categorías: Combustibles, Aceites lubricantes, Fertilizantes y Herbicidas. A continuación (figura 11), los valores de los RNL para cada especies estudiada según su manejo forestal.

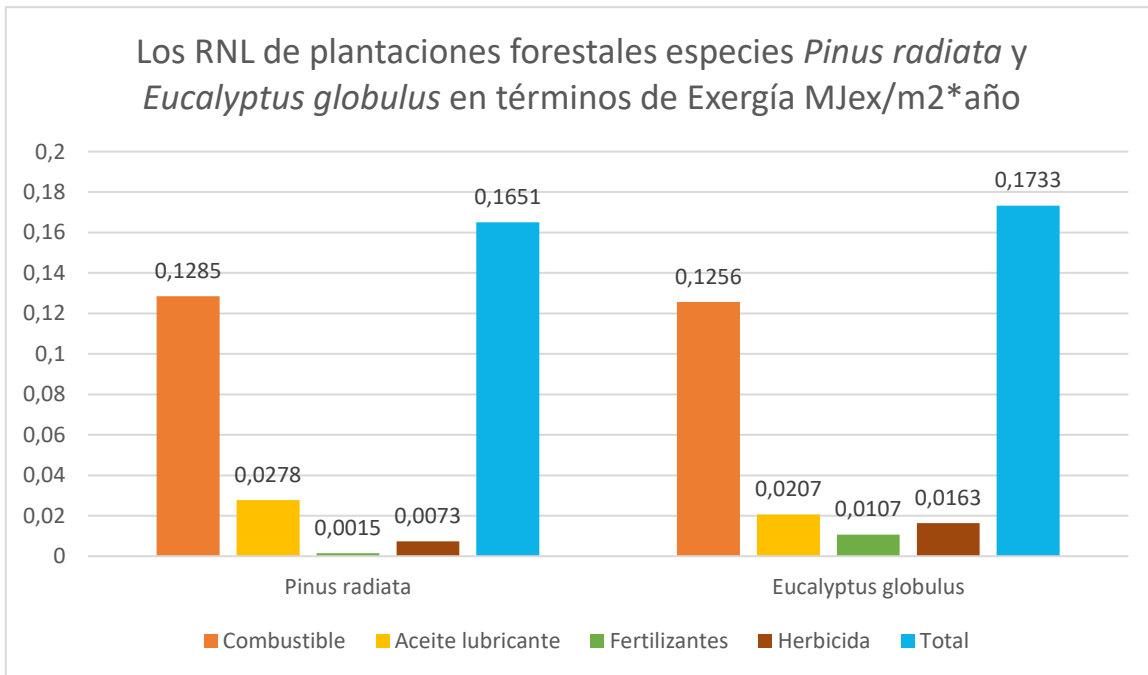


Figura 11. RNL para 1 m² de plantación forestal de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en términos de Exergía MJex/m²*año.

Fuentes: Elaboración propia en base en base los RNL descritos en las entrevista empresa rubro *Pinus radiata* y empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

Desde la figura 11, los valores de los RNL para la especie *Pinus radiata* es de 0,1651 MJex/m²*año por 1m² de superficie cosechada, en el caso de la especie *Eucalyptus globulus* en valor de los RNL corresponde a 0,1733 MJex/m²*año. Como podemos observar de la figura 11. Ambas especies utilizan productos y cantidades similares reflejando valores para los RNL muy parecidos. Detalle de los usos de los RNL en el caso de los fertilizantes y herbicidas estos son aplicados en la etapa de plantación y control de maleza, en este periodo es donde el control de la vegetación competitiva entrega los mayores beneficios, asegurando sobrevivencia y crecimiento de la plantación (Arauco, 2012). En cuanto a los combustibles y aceites lubricantes (2 tiempo) son utilizados en las etapas de raleos y cosecha, hasta este momento las etapas mencionadas son compartidas por ambas especies del estudio, siendo la especie *Pinus radiata* que presenta la etapa de podas pero éstas no utiliza RNL porque los tijerones de poda son una herramienta manual no utiliza combustible.

El mayor valor Exérgico corresponde a la categoría de los combustibles, es decir, la cadena de producción del combustible Diesel y la gasolina de 93 octanaje representan un 77,83% en los RNL de la especie *Pinus radiata* y un 72,48% para los RNL de la especie *Eucalyptus globulus*. La categoría de los fertilizantes obtienen el menor valor Exérgico de los RNL para cada especie de plantación forestal representando un 0,91% para *Pinus radiata* y un 6,17% para la especie *Eucalyptus globulus* de los RNL total.

La categoría de los recursos de aceites lubricantes son los segundos en cantidad de gasto Exérgico, cuyos valores para la especie *Pinus radiata* corresponde a 0,0278 MJex/m²*año, mientras que para la especie *Eucalyptus globulus* es de 0,0207 MJex/m²*año, sus aportes a la Exérgía total de los RNL es de 16,48% y 11,94% respectivamente.

En cuanto a la categoría de herbicidas la especie *Eucalyptus globulus* presenta un mayor valor Exérgico, siendo este de 0,0163 MJex/m²*año y para la especie *Pinus radiata* un valor de 0,0073 MJex/m²*año, es así que en la categoría de recursos de herbicidas la especie eucaliptus supera aproximadamente en 2,2 veces a los

recursos de herbicidas de la especie pino. Esta diferencia se puede atribuir a que los RNL herbicidas de la especie *Eucalyptus globulus* fueron considerados como un producto herbicida universal en el herbicida glifosato RNL herbicida utilizado en el control de maleza de la especie *Pinus radiata* fue considerado como producto glifosato en el método CExD en el programa Simapro. Es importante destacar, que los valores Exergéticos durante la cadena de producción de los agroquímicos dependerán de la cantidad recurso consumidos a lo largo de la producción, pero al mismo tiempo dependerá de la cantidad Exergética que caracteriza a cada recurso. Este último es muy dependiente de la composición química o estructura de los agroquímicos y combustibles, implicando que no solo la cantidad del recurso, sino también su calidad Exergética.

5.4. Análisis del indicador Producción Neta anual de Exergía ($\Delta NExP$).

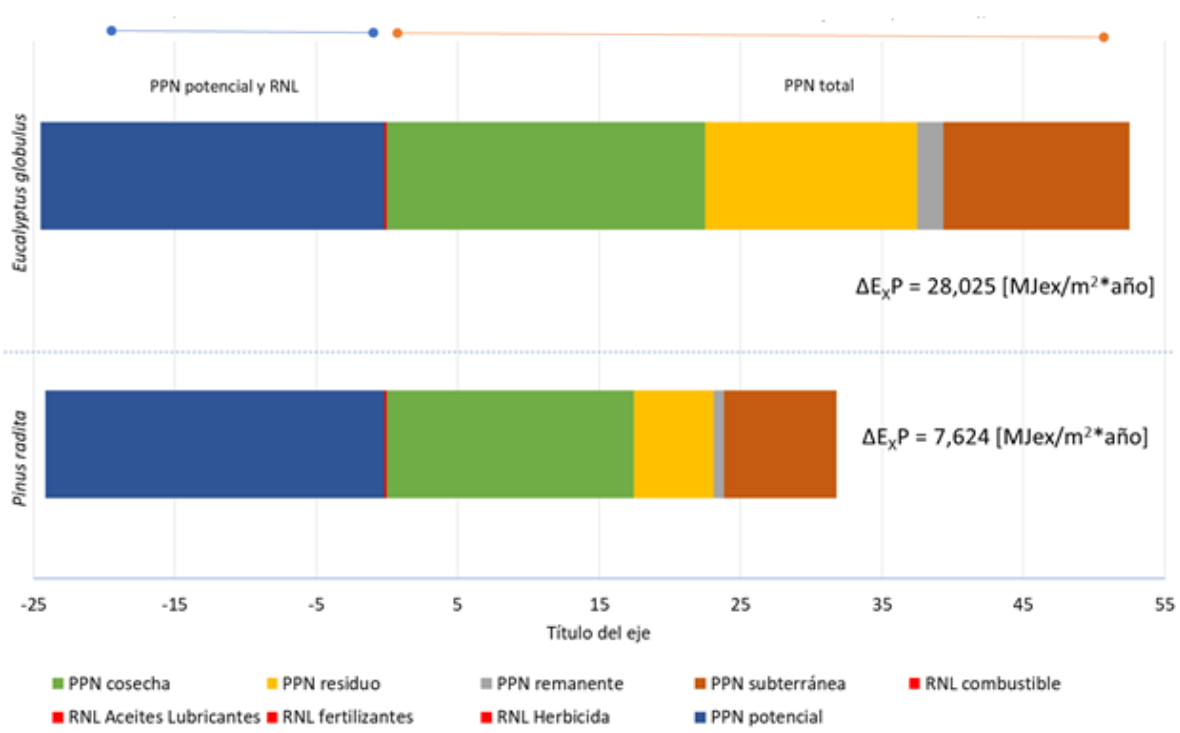


Figura 12. Indicador de Producción Neta anual de Exergía ($\Delta NExP$) para 1 m² de plantación establecida de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, en las regiones de Biobío y Ñuble, año 2015.

Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia en la figura 12. En ambos manejo forestales presentan valores positivos para el indicador $\Delta NExP$. Lo que significa que se produce más recursos de biomasa producto que los recursos locales y no locales consumidos para producirlos, es decir, que las plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, en las regiones de Biobío y Ñuble son eficiente en producción de biomasa cosechada. Mientras mayor sea los valores positivos del indicador $\Delta NExP$, más eficiente productivamente será el manejo forestal. Es por ello, que las plantaciones de *Eucalyptus globulus* presentan los mayores indices de productividad.

Según lo discutido anteriormente, el manejo forestal para la especie *Eucalyptus globulus* es similar en uso de recursos locales $PPN_{potencial} = 24,3 \text{ MJex/m}^2\text{año}$ y los recursos no locales $RNL = 0,1733 \text{ MJex/m}^2\text{año}$ comparado con el manejo de la especie *Pinus radiata* $PPN_{potencial} = 24 \text{ MJex/m}^2\text{año}$ y los recursos no locales $RNL = 0,1651 \text{ MJex/m}^2\text{año}$. En cambio, la especie eucaliptos presenta los mayores rendimientos de biomasa. Este patrón hace que el balance Exergético entre la biomasa producida y los recursos consumidos sea significativamente superior para la especie *Eucalyptus globulus* $\Delta NExP = 28,025 \text{ MJex/m}^2\text{año}$ cuando se compara con la especie *Pinus radiata* $\Delta NExP = 7,624 \text{ MJex/m}^2\text{año}$, siendo aproximadamente 3,7 veces mayor.

Esta gran diferencia entre especies es atribuible a las diferencias de la PPN_{total} , donde la PPN_{total} de la especie *Eucalyptus globulus* es superior en un 65,15%, debido principalmente a que la especie *Eucalyptus globulus* presenta mayores valores de los componentes como el incremento medio anual (IMA), una mayor densidad básica (DB) y mayor factor de expansión de biomasa (BEF) (ver valores de los componentes en la tabla 4). Estos componentes permiten que la especie *Eucalyptus globulus* presente una mayor producción de biomasa total en comparación a la especie *Pinus radiata*.

Como se puede destacar, el balance Exergético es sensible al rendimiento forestal para cada especie. En particular para la especie *Pinus radiata* los rendimientos de este estudio se pueden comparar con la descripción esquema de manejo para madera libre de nudo realizado por INFOR adjuntado en el anexo 7. La particularidad

es reflejada por el mismo manejo que se realiza una densidad de plantación inicial de 1.100 a 1.400 pinos, la realización de 3 podas entre el cuarto y sexto año de la plantación, seguidos de dos raleos para finalmente realizar la cosecha final en un periodo de 24 a 30 años reportando una productividad media final de 600 m³/ha](INFOR, 2015); mientras que este estudio reporta un rendimiento de cosecha final de 512 m³/ha cuyo rendimiento está en el rango sugerido.

En relación a la especie *Eucalyptus globulus* según el informe técnico N°194 de CORMA e INFOR los datos operacionales empresas promedian que en los años 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011 el rendimiento promedio es de 287,34 m³/ha con un periodo de cosecha de 13 años mientras tanto que lo informado por este estudio corresponde a 295 m³/ha con periodo de cosecha de 14 años, nos demuestra que el dato entregado por la empresa rubro eucalipto no está alejado a los rendimientos nacionales (INFOR-MINAGRI, 2013).

Además, como los valores Exergéticos están estandarizados a los años de cosecha de cada plantación forestal, nuevamente la especie *Eucalyptus globulus* tiene una ventaja ya que, su periodo de cosecha es menor siendo está a los 14 años; en cambio las plantaciones de *Pinus radiata* es de 21 años. Esto permite, que al estandarizar los recursos consumidos y la producción de biomasa producida a un año, mediante la división por el periodo de tiempo de la cosecha trae consigo que la cantidad de biomasa producida y recursos consumidos anuales sean mayores que los obtenidos para las plantaciones de pino.

En cuanto a los recursos no locales, en este caso de estudio no presenta un papel fundamental en dicho balance Exergético es despreciable en comparación con la PPN_{total} y PPN_{potencial}. Estos resultados de los RNL se deben a que el manejo forestal para ambas plantaciones forestales es una actividad manual, en lo mayoría de los casos utilizando solo una pala, continuando con la actividad de las podas y limpieza de la troza respecto a las ramas, se fomenta el uso de herramientas manuales tales como el tijerón de poda y hachas, las cuales no requieren del uso de combustible. Los mayores consumos de los RNL agroquímicos se realizan en los primeros años de la plantación en las etapas de fertilización y control de maleza

ya que, en estas etapas es fundamental realizar un manejo óptimo para el desarrollo ideal de las plantaciones forestales. En cuanto al uso de combustibles estos son utilizados en las etapas de raleos y cosecha, uso de diésel en el arrumado de los trozos por la utilización de maquinarias mecánicas ya sea un tractor o bell y el uso de gasolina 93 octanaje corresponde por la utilización de la herramienta motosierra.

Reportándose durante todo el periodo de cosecha para la especie *Pinus radiata* con el consumo de 531,36kg de RNL se produce un total de biomasa de 114.839,28 [kg de biomasa total] con un rendimiento 0,0046 kg de RNL/kg de biomasa total, en el caso de la especie *Eucalyptus globulus* se consumen 339,03 kg de RNL para producir 73.484,5 kg de biomasa total con un rendimiento de 0,0046 kg de RNL/kg de biomasa total. Como podemos observar el rendimiento de los usos de los recursos no locales respecto a la biomasa para ambas especies es igual, en consecuencia el manejo forestal para ambas especies es óptimo en cuanto a una cosecha final deseable productivamente y económicamente. Existe un efecto sinérgico entre la preparación de suelo, fertilización y control de maleza combinadas, tienen efectos positivos que se reflejan en un mayor volumen inicial y un mejor desarrollo de futuras plantaciones de rápido crecimiento (INFOR, 2015). No obstante una plantación forestal sin manejo forestal se puede obtener un mayor volumen de cosecha final esta serian con fines pulpable o leña mientras cuando se aplica un manejo forestal intensivo se garantiza un producto final mejorado y de mayor costo comercial por ejemplo madera aserrable libre de nudos (INFOR, 2015).

Los resultados obtenidos en el presente estudio se pueden comparar con otros sistemas productivos agrícolas para los cuales se han reportado balances Exergéticos tales como fruta de palma en Malasia, caña de azúcar en Brasil, maíz y trigo en Francia, papas y trigo en Estados Unidos, reportados por Alvarenga et al., (2013). Donde se puede concluir que los valores reportados son coherentes con los sistemas agrícolas según se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Balance Exergético de sistemas productivos de manejo agrícola y forestal en diferentes países del continente américa.

Sistema productivo	País	ΔE_xP MJex/m ² *año
Manejo agrícola de maíz y soja	Estado de Mato Grosso Brasil	2,58
Manejo agrícola de caña de azúcar	Estado de Sao Paulo, Brasil	26,36
Manejo agrícola de maíz y soja	Estado de Iowa, Estados Unidos	10,69
Manejo agrícola de papas, trigo y trigo	Estado de Idaho, Estados Unidos	-2,74
Manejo forestal eucalipto	Región Biobío, Chile	28,03
Manejo forestal pino	Región Biobío, Chile	7,62

Fuente: Elaboración propia y (Alvarenga, Dewulf, & Van Langenhove, 2013).

Las principales diferencias entre un manejo agrícola y forestal reportados en la tabla 15. Los manejos agrícolas presentan periodos de cosecha rápidos de 1 año y una rotación de cultivo por temporada, por ejemplo manejo agrícola de maíz y soja en el estado de Iowa (EEUU) el primer año se cosecho maíz y en el segundo año se cosecho soja, se puede apreciar que son productos agrícolas con periodo de cosecha cortos incluso de meses. El caso del manejo agrícola en el Estado de Idaho la eficiencia es negativa, esto se puede atribuir que los productos cosechados requieren mucho más RNL para en un m² de superficie cosechada.

Si comparamos los productos agrícolas del país Brasil notamos una gran diferencia entre la caña de azúcar con una eficiencia de 26,36 MJex/m²*año en comparación de los alimentos soja y maíz con una eficiencia de 2,58 MJex/m²*año, si bien estos productos fueron cosechados en distintas localidades de Brasil, nos permite visualizar nuevamente que existen especies vegetales que se adaptan mejor a una localidad y por ende entregan una mayor producción. La misma observación anterior podemos aplicar en las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* que ambas fueron cosechadas en la región de Biobío en Chile pero la especie *Eucalyptus globulus* presenta una mayor eficiencia productiva, mejor aprovechamiento del

suelo, recordando ambas especies presenta un consumo similar de RNL pero el eucalipto presenta un periodo de cosecha menor produciendo más de la mitad 295 m³ de la biomasa del pino en su periodo de cosecha final 414,4 m³.

Es importante destacar, que el uso de la Exergía como métrica, permite además que visualizar la cantidad con que se usa los recursos, también evalúa la eficiencia con que se usa el suelo y al mismo tiempo facilita la comparación entre diferentes casos de estudios.

En el caso hipotético que en el balance del indicador $\Delta NExP$ se considere en las salidas la suma de la PPN cosecha y PPN residuos, correspondientes a la biomasa producida útil económicamente, ya sea utilizada como metro aserrable, metro pulpable, leña, chipeada, etc. En las entradas del balance se mantienen intactas la suma de la PPN potencial y los RNL, al aplicar las nuevas condiciones con la finalidad de encontrar la eficiencia útil y económicas de las plantaciones forestales, la eficiencia de estas dichas se ven disminuida en el caso de la especie *Eucalyptus globulus* tendría una disminución de un 47% a una eficiencia nueva de 13,182 MJex/m²*año. En el caso de la especie *Pinus radiata* la eficiencia la eficiencia es desfavorable, ya que esta es negativa siendo -0,95 MJex/m²*año, ver gráfico en anexo 8. Recomendaciones para aumentar la eficiencia de la especie *Pinus radiata* que el volumen de cosecha debe ser superior a 500 m³, así aumenta el rendimiento de la biomasa cosechada.

Hasta el momento no existen estudios que realicen estudios similares de balances Exergéticos para sistemas forestales. Sin embargo, los resultados del indicaros estudiado corrobora los resultados reportados por Dominique 2019, quien concluye que los usos del suelo de las plantaciones forestales son los de mayores eficiencias en su uso, para cuando se usan el indicador PPN expresado en Exergía para el año 2014 en la región del Biobío de 88,6 MJex/m²*año. Sin embargo estos resultados no significan que desde el punto de vista ambiental las prácticas forestales no impliquen impactos sobre los ecosistemas. En este sentido, varios estudios realizados a escala regional han abordado que la expansión forestal ha traído consigo pérdidas de especies nativas y endémicas en la zona central de Chile,

fragmentación del hábitad por la expansión de especies exóticas, además del aumento de la erosión del suelo y la calidad y disponibilidad de agua reducción la capacidad de regulación morfo sedimentaria de la cuenca del río Biobío (Martínez et al., 2019).

Según la evidencia de la deforestación histórica en Chile central por el Laboratorio de Ecología de Paisaje de la Universidad de Concepción, el ser humano ha modificado el 70% de la superficie terrestre, en Chile el principal factor de pérdidas de ecosistemas nativos es el cambio de uso del suelo asociados al sector minero, agrícola, forestal y acuícola, donde hoy existe un 67% menos de bosques nativos que lo que había en el año 1975. Además en 36 años, se ha registrado una pérdida de 950 mil hectáreas desde la región de Valparaíso a Biobío, 64% de bosque esclerófilo y un 21% de matorrales espinales (LEP, 2021).

6.- CONCLUSIÓN.

En este estudio se evaluó el indicador de Producción Neta anual de Exergía (ΔNExP) para las plantaciones forestales de las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en la regiones del Biobío y Ñuble. Este indicador está basado en el balance de los uso de los recursos naturales y recursos adicionados por el humano, en la producción de biomasa sobre el uso del suelo como recurso natural. El indicador ΔNExP proporciona información sobre la sustentabilidad de los sistemas forestales, indicando que mientras mayor y positivo sea el indicador, más sustentable y eficiente es el sistema productivo.

Para ambas plantaciones forestales el valor del indicador fue positivo, sin embargo los mayores valores positivos fueron obtenidos para el manejo de la especies *Eucalyptus globulus*, indicando que es más sustentable en términos de calidad en el uso de los recursos que las plantaciones de *Pinus radiata*.

El manejo forestal de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* presentaron mayores eficiencias Exergética 28,025 MJex/m²*año en comparación con la de la especies *Pinus radiata* 7,622 MJex/m²*año. Estas diferencias se atribuyen a los valores mayores en los factores de incremento medio anual (IMA), densidad básica (DB) y factor de biomasa (BEF) que presenta la especie eucalipto sobre el pino. Esta eficiencia mayor de la especies *Eucalyptus globulus* podría deberse al periodo de cosecha de 14 años versus los 21 años de cosecha de la especie *Pinus radiata*.

En cuanto a la interacción del humano por parte de los recursos no naturales (RNL), estos no presentaron un papel fundamental al momento de la producción final de biomasa para ambas especies. Sin embargo, las buenas prácticas y la aplicación óptima del fertilizante y el herbicida mejoran la calidad de las plantaciones y aumentan su valor comercial junto con las aplicaciones de podas y raleos. Esto corrobora que la eficiencia de los sistemas forestales está dominado principalmente por los rendimientos de biomasa y por los valores de los recursos locales, expresado en la $\text{PPN}_{\text{potencial}}$.

Los resultados del análisis de Exergía destacaron la complejidad $\Delta NExP$ y su dependencia de las condiciones locales. Sin embargo, el indicador propuesto solo considera la cantidad de recursos totales durante el manejo forestal, pero no tiene en cuenta los impactos ambientales relacionados. Asimismo, el análisis de sostenibilidad involucra dimensiones ambientales, sociales y económicas; por lo tanto, se recomienda considerar los factores mencionados anteriormente para desarrollar estrategias forestales más sostenibles.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Alvarenga, R. A. F., Dewulf, J., & Van Langenhove, H. (2013). A new natural resource balance indicator for terrestrial biomass production systems. *Ecological Indicators*, 32, 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.03.029>
- Alvarenga, R. A. F., Dewulf, J., Van Langenhove, H., & Huijbregts, M. A. J. (2013a). Exergy-based accounting for land as a natural resource in life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 939–947. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0555-7>
- Alvarenga, R. A. F., Dewulf, J., Van Langenhove, H., & Huijbregts, M. A. J. (2013b). Exergy-based accounting for land as a natural resource in life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 939–947. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0555-7>
- Alvarenga, R. A. F., Erb, K. H., Haberl, H., Soares, S. R., van Zelm, R., & Dewulf, J. (2015). Global land use impacts on biomass production—a spatial-differentiated resource-related life cycle impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 440–450. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0843-x>
- Andrade, C. (2020). *EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LA INTERVENCIÓN HUMANA SOBRE EL USO DE SUELO BASADO EN PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA EN TÉRMINOS DE EXERGÍA EN LAS REGIONES DE ÑUBLE Y BIOBÍO.*
- Arauco. (2012). *Guía para el manejo de la vegetación competidora en forestal arauco.*
- Banfield, C. C., Braun, A. C., Barra, R., Castillo, A., & Vogt, J. (2018). Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile. *Catena*, 161(September 2017), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.017>

- Beazley, K. F. (2007). *Human appropriation of net primary production (HANPP) in Nova Scotia , Canada*. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10113-006-0021-1>
- Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A. J., & Frischknecht, R. (2007). *Cumulative Exergy Demand LCA Methodology Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the ecoinvent Database **. 12(3), 181–190.
- Cardemil, J. E., Spa, N., Ruiz, E., & Valenzuela, S. (2006). *Identificación del origen de Eucalyptus globulus en el Centro Sur de Chile mediante un marcador molecular (RAPD)*. (February 2015).
- Conaf. (2013). Guía básica de buena practicas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios. Retrieved from http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1386687876guiabuena practicas_ppf.pdf
- Conaf. (2015). Catastro Vegetacional. Retrieved from <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>
- Conaf. (2016). *PLANTACIONES FORESTALES EFECTUADAS DURANTE EL AÑO 2015*. 1–165.
- Defensores del Bosque Chileno. (1998). La Tragedia del bosque chileno. In A. Hoffmann J. (Ed.), *Defensores del Bosque Chileno* (p. 286).
- Dewulf, J, Meester, B. De, Vorst, G. Van Der, Langenhove, H. Van, Bösch, M., Hellweg, S., ... Crude, S. (2007). *Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting Supporting Information S1 . Full list of ecoinvent resource reference flows and recommended X factors Supporting*.
- Dewulf, Jo, Van Langenhove, H., Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B. R., Grubb, G. F., & Paulus, D. M. (2008). Exergy : Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology. *Environmental Science and Technology*, 42(7), 2221–2232. <https://doi.org/10.1021/es071719a>
- Erb, K., Krausmann, F., Gaube, V., Gingrich, S., Bondeau, A., Fischer-kowalski, M., & Haberl, H. (2009). Analyzing the global human appropriation of net primary

production — processes , trajectories , implications . An introduction ☆.
Ecological Economics, 69(2), 250–259.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.001>

FAO. (2015). Suelos sanos para una vida sana. Retrieved May 10, 2019, from
<http://www.fao.org/soils-2015/faq/es/>

FAO. (2019). Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Retrieved May 10, 2019, from
<http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>

Forestal Mininco. (2010). *Procedimiento de calibración de maderas aserrables y pulpables*.

Goecke, D. (2019). *EFFECTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO SOBRE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA AÉREA EXPRESADA EN TÉRMINOS DE EXERGÍA DE LAS REGIONES DEL BIOBÍO Y ÑUBLE, CHILE*.

Haberl, H., Erb, K.-H., & Krausmann, F. (2014). Human Appropriation of Net Primary Production: Patterns, Trends, and Planetary Boundaries. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), 363–391. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-121912-094620>

Haberl, H., Erb, K. H., Krausmann, F., Gaube, V., Bondeau, A., Plutzer, C., ... Fischer-kowalski, M. (2007). Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Union Medicale Du Canada*, 104(31), 12942–12947. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704243104>

Hughes, A. O., & Quinn, J. M. (2019). Forest Ecology and Management The effect of forestry management activities on stream water quality within a headwater plantation *Pinus radiata* forest. *Forest Ecology and Management*, 439(March), 41–54. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.035>

INFOR-MINAGRI. (2013). *Disponibilidad de madera de plantaciones de pino radiata y eucalipto (2010-2040)*. 194.

INFOR. (2015). *Propuesta de acciones para minimizar las brechas en el manejo de plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios informe final*. 185.

- INFOR. (2017). Anuario Forestal 2017. Retrieved from <https://www.infor.cl/index.php/destacados-home/329-anuario-forestal-2017-boletin-n-159>
- Koellner, T., Baan, L. De, Beck, T., Souza, D. M. De, & Müller-wenk, R. (2013). *UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA*. 1188–1202. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z>
- Langlois, J., Fréon, P., & Steyer, J. (2014). *Sea-use impact category in life cycle assessment: state of the art and perspectives*. 994–1006. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0700-y>
- LEP. (2021). ¿Cuál ha sido la deforestación histórica en Chile central? Retrieved from <https://lep.udec.cl/recursos-y-publicaciones/>
- Martínez, Y., Goecke, D., & Aguayo, M. (2019). *Effects of landcover changes on net primary production (NPP) -based exergy in south-central of Chile*. 113(April). <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102101>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems AND HUMAN WELL-BEING*.
- Ministerio del Agricultura. (2016). *PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE LA INDUSTRIA FORESTAL : ESTRUCTURA , AGENTES Y PRÁCTICAS*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Segundo Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile serie 1990-2013. Retrieved from www.snichile.cl.
- Núñez, M., Antón, A., Muñoz, P., & Rieradevall, J. (2013). Inclusion of soil erosion impacts in life cycle assessment on a global scale: application to energy crops in Spain. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(4), 755–767. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0525-5>
- ODEPA. (2018). Región del Biobío información general 2018. Retrieved from <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/Biobio.pdf>

- Olson, D., Dinerstein, E., Wikramanaye, E., Burgess, N., Powell, G., Underwood, E., ... Kassem, K. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. *Bioscience*, *51*, 933–938.
- Prado D., J. A. (2015). Plantaciones forestales más allá de los árboles. *Colegio de Ingenieros Forestales de Chile A.G.*
- SEMARNAT. (2017). Uso de suelo y vegetación. Retrieved November 9, 2020, from Sistema Integral de Información Ambiental del Estado de Coahuila website: <https://www.sema.gob.mx/SRN-SIIAECC-USO-CAMBIO.php#:~:text=La SEMARNAT describe al cambio,composición de las especies presentes.>
- Song, X., Hansen, M. C., Stephen, V., Peter, V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., & Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>
- Taelman, S. E., Meester, S. De, Schaubroeck, T., Sakshaug, E., Alvarenga, R. A. F., & Dewulf, J. (2014). Resources , Conservation and Recycling Accounting for the occupation of the marine environment as a natural resource in life cycle assessment: An exergy based approach. *“Resources, Conservation & Recycling,”* *91*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.009>
- Taelman, S. E., Schaubroeck, T., De Meester, S., Boone, L., & Dewulf, J. (2016). Accounting for land use in life cycle assessment: The value of NPP as a proxy indicator to assess land use impacts on ecosystems. *Science of the Total Environment*, *550*, 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.055>

8. ANEXOS.

Anexo 1: PPN potencial de las plantaciones forestales especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* en la región Biobío y Ñuble para el año 2015.

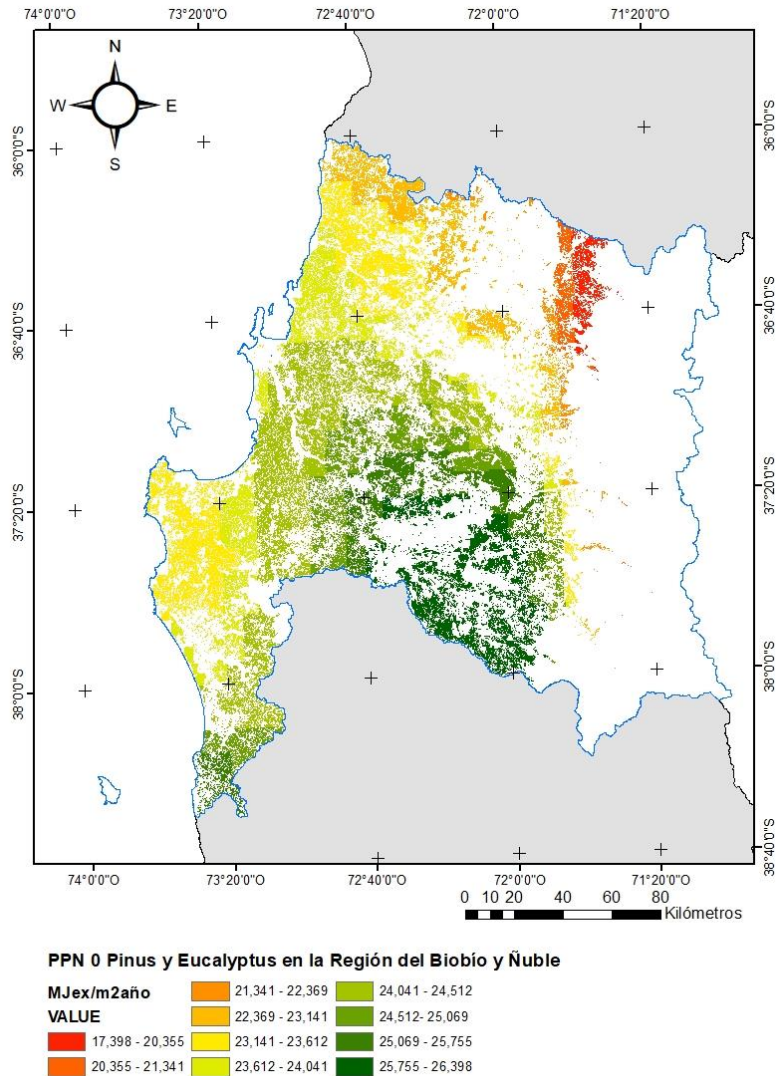


Figura 13. PPN potencial de las plantaciones forestales en la Regiones de Biobío y Ñuble para el año 2015.

Fuente: elaboración propia con datos de capa (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013b) y catastro de cobertura vegetal (Conaf, 2015).

Anexo 2. Capa mundial de los PPN potencial, en terminos de Exergía MJex/m²*año.

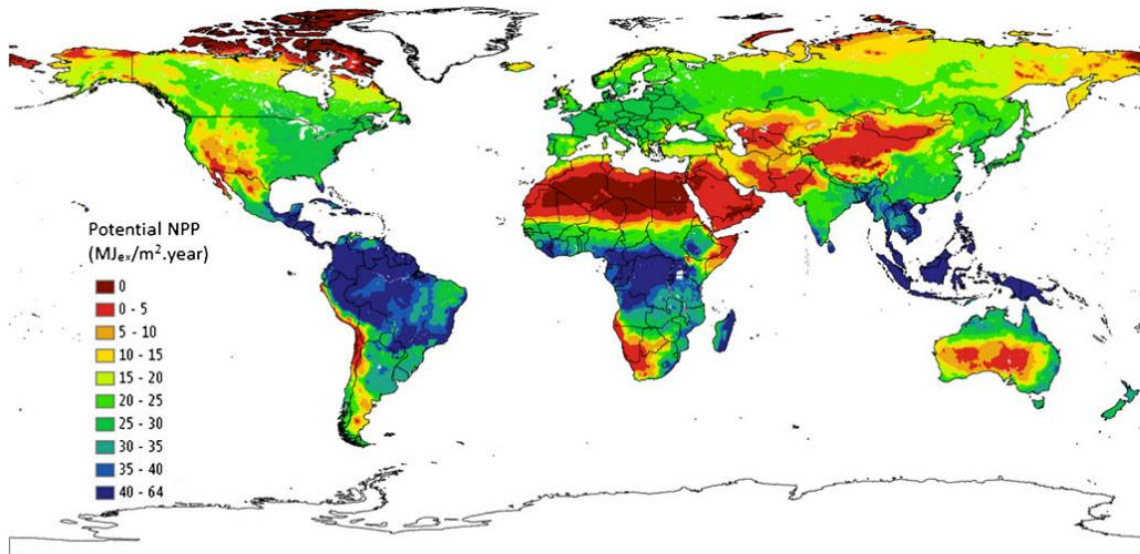


Figura 14. Capa mundial basado en la disponibilidad de PPN potencial en unidades de MJex /m²año.

Fuente: (Alvarenga, Dewulf, Van Langenhove, et al., 2013b)

Anexo 3. Entrevista a empresa dedicada al manejo de la especie *Pinus radiata*.

Fecha: 17/01/2021

Inventario plantación forestal tipo *Pinus radiata*, unidad funcional 1 hectárea de plantación establecida.

Nombre: Hernán González Leiva

Cargo laboral: Gerente

Características del manejo forestal de la especies *Pinus radiata*, en base a 1 hectárea de plantación establecida.

Especie: *Pinus radiata*.

Edad cosecha: 21 años.

Preparación del terreno:

- Descripción: previamente se realiza un roce mecanizado de limpieza del predio, posteriormente la realización de fajas manuales mediante una maquinaria pesada.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: para rozar se utiliza motosierra o desbrozadora, para la realización de las fajas manuales se utiliza retroexcavadora.
- Consumo de combustibles: roce 30 litros de gasolina 93, retroexcavadora 60 litros de Diesel.

Control de maleza pre plantación:

- Descripción de aplicación de herbicidas: se realizan 1 aplicaciones química antes de la plantación, con los siguientes agroquímicos: 3,5 litros de glifosato.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: pulverizador manual.

Plantación:

- Descripción: se realiza mediante cultivo manual mediante una pala plantadora, se utilizan plántulas a raíz cubierta, con 30 centímetros de profundidad. Se plantaran 1000 plántulas de pino por hectárea.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: pala plantadora, traslado de plántulas camioneta 4x4.
- Consumo de combustible: 5 litros de Diesel aproximadamente.

Fertilización:

- Descripción de aplicación de fertilizantes: se aplica una dosis del fertilizante boro calcita granulado días posteriores a la plantación, se aplica la cantidad de 30 kg/ha.

- Maquinaria utilizada o herramienta manual: vaso granulado con la dosis de 30 grs. Traslado de los sacos de fertilizante en camioneta 4x4.
- Consumo de combustible: 5 litros de Diesel aproximadamente.

Control de maleza post plantación:

- Descripción de aplicación de herbicidas: se realizan dos aplicaciones química post plantación, la primera a los 4 meses de la plantación y la segunda a 24 meses de la plantación. En ambas aplicación de control de maleza se utilizara 1,3 litros de glifosato por hectárea.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: pulverizador manual.
- Consumo de combustible: no aplica

Raleo:

- Descripción raleo: se realizan dos raleo que consisten en seleccionar los pinos de calidad buena y reducir la densidad por hectárea para un desarrollo de la plantación. El primer raleo se realiza a los 5 años y se deja una densidad de 700 pinos/ha, los pinos talado se dejan el predio para su descomposición. El segundo raleo se realiza a los 10 años para dejar una densidad aproximada de 450 pinos/ha, los pinos talados son vendido como madera pulpable.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: motosierra, consumo en primer raleo 2,7 litros de bencina 93, segundo raleo 6 litros de bencina 93, arrumado en cancha realizado por un bell, consumo 32 litros de Diesel. Acercamiento de la madera a la cancha realizada por un tractor, consumo 20 litros de Diesel.

Podas:

- Descripción podas: las podas consisten en la eliminación de las ramas vivas o muertas de la parte baja del tronco del pino mediante la herramienta manual tijerón, se aplicaran 3 podas, la primera a los 4 años y se podaran 700 pinos, la segunda poda a los 6 años y se podaran 550 pinos y finalmente la tercera poda a 7 años donde se podan 425 pino. Las ramas podas quedan en el predio para su descomposición.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: tijerones de poda.
- Consumo de combustible: no aplica

Cosecha final:

- Descripción de cosecha: se realiza una tala completa de 425 pinos, tala realizado por motosierra, madereo de acercamiento a cancha por un tractor y el arrumado de la madera por un bell.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: motosierra, tractor y bell.

- Consumo de combustibles: motosierra 75 litros de bencina 93/ha, combustible utilizado por el tractor 140 litros/ha y bell 80 litros/ha.

Retiro de los desechos post cosecha:

- Descripción: los residuos post cosecha son dispuestos en fajas manuales dentro del predio.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: retroexcavadora.
- Consumo de combustible: 60 litros por hora.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 4. Entrevista a empresa dedicada al manejo forestal de la especie *Eucalyptus globulus*.

Fecha: 22/04/2021

Inventario plantación forestal tipo *Eucalyptus globulus*, unidad funcional 1 hectárea de plantación establecida.

Nombre: Ricardo Montesinos Ruiz

Cargo laboral: Jefe de Área Forestal

Características del manejo forestal de la especies *Eucalyptus globulus*, en base a 1 hectárea de plantación establecida.

Especie: *Eucalyptus globulus*.

Edad cosecha: 14 años.

Preparación del terreno:

- Descripción: se realizan fajas mecanizadas para habilitar rodales a plantar.
- Maquinaria utilizada: retroexcavadora.
- Consumo de combustible de maquinaria: 60 litros de Diesel aproximadamente.

Control de maleza pre plantación:

- Descripción de aplicación de herbicidas: se realizan 1 aplicaciones química antes de la plantación, con los siguientes agroquímicos: Raundap 3 kg/ha, Simazina 3 kg/ha, Silwet 50 cc/ha, aliado forestal 0,3kg/ha.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: bomba espalda SOLO, capacidad 20 litros.

Plantación:

- Descripción: se realiza mediante cultivo manual con un espaciamiento de 2,5 m * 3 m, se utilizan plántulas a raíz cubierta tipo speedling. Se plantaran 1333 plántulas de eucalipto por hectárea.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: pala plantadora, traslado de plántulas camioneta 4x4.
- Consumo de combustible: 8 litros de Diesel aproximadamente.

Fertilización:

- Descripción de aplicación de fertilizantes: se aplica una dosis de fertilizante directo al momento de plantar en el cultivo que se hace para establecer la plántula en el suelo. La dosis corresponde a 30 grs por planta. De un fertilizante de entrega lenta (Forestkote).

- Maquinaria utilizada o herramienta manual: vaso granulado con la dosis de 30 grs. Traslado de los sacos de fertilizante en camioneta 4x4.
- Consumo de combustible: 5 litros de Diesel aproximadamente.

Control de maleza post plantación:

- Descripción de aplicación de herbicidas: se realizan dos aplicaciones química post plantación, la primera a los dos meses del establecimiento y la segunda a 8 meses del establecimiento. Raundap 3 kg/ha, Silwet 50 cc/ha, aliado forestal 0,3kg/ha.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: bomba espalda SOLO, capacidad 20 litros.

Cosecha final:

- Descripción: corta de los eucaliptus a tala raza en toda la superficie.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: motosierra.
- Consumo de combustible: 30 litros aproximados por hectárea y 15 litros aproximados de aceite cadena biodegradable.

Acercamiento de la madera a la cancha de arrumado:

- Descripción: se maderea los fustes de los eucaliptus desde el lugar de volteo a la cancha de arrumado.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: Skkider
- Consumo de combustible: 25 litros por hora, aproximadamente 8 horas en cosecha de 1 hectárea, total 200 litros.

Retiro de los desechos post cosecha:

- Descripción: los residuos post cosecha son dispuestos en fajas manuales dentro del predio.
- Maquinaria utilizada o herramienta manual: retroexcavadora.
- Consumo de combustible: 60 litros por hora.

*según el entrevistado en su manejo forestal la especie *Eucalyptus globulus* no presenta la etapa de podas y raleos.

Fuente: elaboración propia.

Anexo 5. Conversión de los Recursos No Locales de los manejos forestales a unidades de Kg/m²año.

Tabla 16. Conversión de los RNL de los manejos forestales de las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* a unidades de Kg/m²*año.

RNL para 1 hectárea de <i>Pinus radiata</i> , edad cosecha 21 años						
Recurso no local	Cantidad	Unidad origen	equivalente a 1kg	Peso en Kg	Estandarizado por kg/ha*año	Kg/m ² año
Diésel	402	Litros	0,85	341,7	16,27142857	0,00162714
Gasolina 93	113,7	Litros	0,68	77,316	3,681714286	0,00036817
Aceite mezcla de 2 tiempo	28,425	Litros	0,877	24,928725	1,187082143	0,00011871
Aceite cadena biodegradable	56,85	Litros	0,877	49,85745	2,374164286	0,00023742
Boro calcita granulado	30	Kilogramos	1	30	1,428571429	0,00014286
Glifosato	6,1	Litros	1,24	7,564	0,360190476	3,6019E-05
RNL para 1 hectárea de <i>Eucalyptus globulus</i> , edad cosecha 14 años						
Recurso no local	Cantidad	Unidad origen	equivalente a 1kg	Peso en Kg	Estandarizado por kg/ha*año	Kg/m ² año
Diésel	273	Litros	0,85	232,05	16,575	0,0016575
Gasolina 93	60	Litros	0,68	40,8	2,914285714	0,00029143
Aceite mezcla de 2 tiempo	15	Litros	0,877	12,278	0,877	0,0000877
Aceite cadena biodegradable	30	Litros	0,877	26,31	1,879285714	0,00018793
Raundap	9	Kilogramos	1	9	0,642857143	6,4286E-05
Simazina	3	Kilogramos	1	3	0,214285714	2,1429E-05
Silwet	0,15	Litros	0,856	0,1284	0,009171429	9,1714E-07
Aliado forestal	0,9	Kilogramos	1	0,9	0,064285714	6,4286E-06
Forestkote	39,99	Kilogramos	1	39,99	2,856428571	0,00028564

Fuente: Elaboración propia en base a entrevista a las empresas de rubro forestal *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Anexo 6. Rendimientos de las podas, raleos y cosecha para cada especie de plantación forestal *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

Tabla 16. Resumen de los rendimientos de los manejos forestales en las especies *Pinus radita* y *Eucalyptus globulus*.

PPN AÉREA	PROCESO SILVÍCOLA	PINUS RADIATA EDAD COSECHA 21 AÑOS	EUCALYPTUS GLOBULUS EDAD COSECHA 14 AÑOS
PPN COSECHA	Biomasa Raleo desecho [m ³]	8,085	No aplica
	Biomasa Raleo comercial [m ³]	43,79	No aplica
	Biomasa Cosecha final [m ³]	414,375	295
PPN RESIDUO	Biomasa Poda 1 [m ³]	2,062	No aplica
	Biomasa Poda 2 [m ³]	9,071	No aplica
	Biomasa Poda 3 [m ³]	18,692	No aplica
	Biomasa, Raleo Desecho [m ³]	3,133	No aplica
	Biomasa, Raleo Comercial [m ³]	29,68	No aplica
	Biomasa, Cosecha Final [m ³]	87,62	196,67*
PPN REMANENTE	Biomasa Remanente [m ³]	20,16*	24,16*

* calculo en base a los valores de Exergía obtenido según las consideración de la PPN aérea para cada especies de plantación forestal.

Fuente: Elaboración propia en base entrevista empresa rubro *Pinus radiata* y empresa rubro *Eucalyptus globulus*.

Anexo 7. Manejo para *Pinus radiata* para madera libre de nudos.

Cuadro 3: Descripción esquemas de manejo para madera libre de nudos

Factor	Descripción
Densidad	<ul style="list-style-type: none"> La densidad inicial de plantación varía aproximadamente entre 1.000 y 1.600 árboles por hectárea, siendo la más común entre 1.100 a 1.400.
Podas	<ul style="list-style-type: none"> La primera poda se realiza entre el cuarto a sexto año de edad cuando el rodal alcanza una altura total dominante de 5 a 6,5 metros. La altura de poda en esta primera intervención alcanza al 50% de la altura total de cada individuo. Posteriormente se realizan dos a tres podas (en caso muy excepcionales pueden llegar hasta 5, hasta alcanzar una altura máxima de 6,5 a 8,3 metros de fuste libre de ramas. La altura de poda en estas intervenciones nunca debería superar el 40% de la altura total para no incidir negativamente en el crecimiento. En caso de que el diámetro de las ramas tiende a engrosar mucho por efecto de raleos fuertes se podría llegar con la poda a un 50% de la altura total para favorecer la producción de madera libre de nudos, aun siendo en desmedro del crecimiento.
Raleos	<ul style="list-style-type: none"> Se realiza el primer raleo a desecho o no comercial entre los 4 a 6 años de edad, según el criterio de altura total dominante (5 a 6,5 m), coincidiendo con la primera poda y seleccionando los individuos que presentan mejor forma y crecimiento y asegurando una distribución homogénea en el rodal. En esta primera intervención se reduce el 50 a 60% de la densidad inicial de plantación. El segundo raleo (primer raleo comercial) se realiza cuando el rodal alcanza una altura total dominante de 11 a 17 metros (9 a 12 años) y se extrae dependiendo del sitio un volumen aproximado de 15 a 65 m³/ha. En algunos casos se realiza un segundo raleo comercial cuando el bosque alcanza una altura total dominante de 18 a 21 metros (13 a 16 años) y se extrae un volumen aproximado de 15 a 50 m³/ha. La densidad final depende del diámetro objetivo del rodal puede variar entre 200 a 450 árboles por hectárea (lo más frecuente es 250-300). El periodo de abril a julio es recomendable para realizar raleos, favoreciendo así la respuesta de los individuos remanentes frente al crecimiento diamétrico en la temporada primaveral y estival siguiente (Berti, 1985 citado por Hernández, 1991).
Cosecha	<ul style="list-style-type: none"> La corta final se realiza entre los 24 y 30 años, obteniéndose una productividad media final al fin de la rotación de 600 m³/ha.

Figura 15. Descripción esquemas de manejo para madera libre de nudos.

Fuente: (INFOR, 2015).

Anexo 8. Balance global de recursos en términos de Exergía [MJex/m²*año] en las plantaciones forestales especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, en la Regiones de Biobío y Ñuble, año 2015. Caso hipotético.

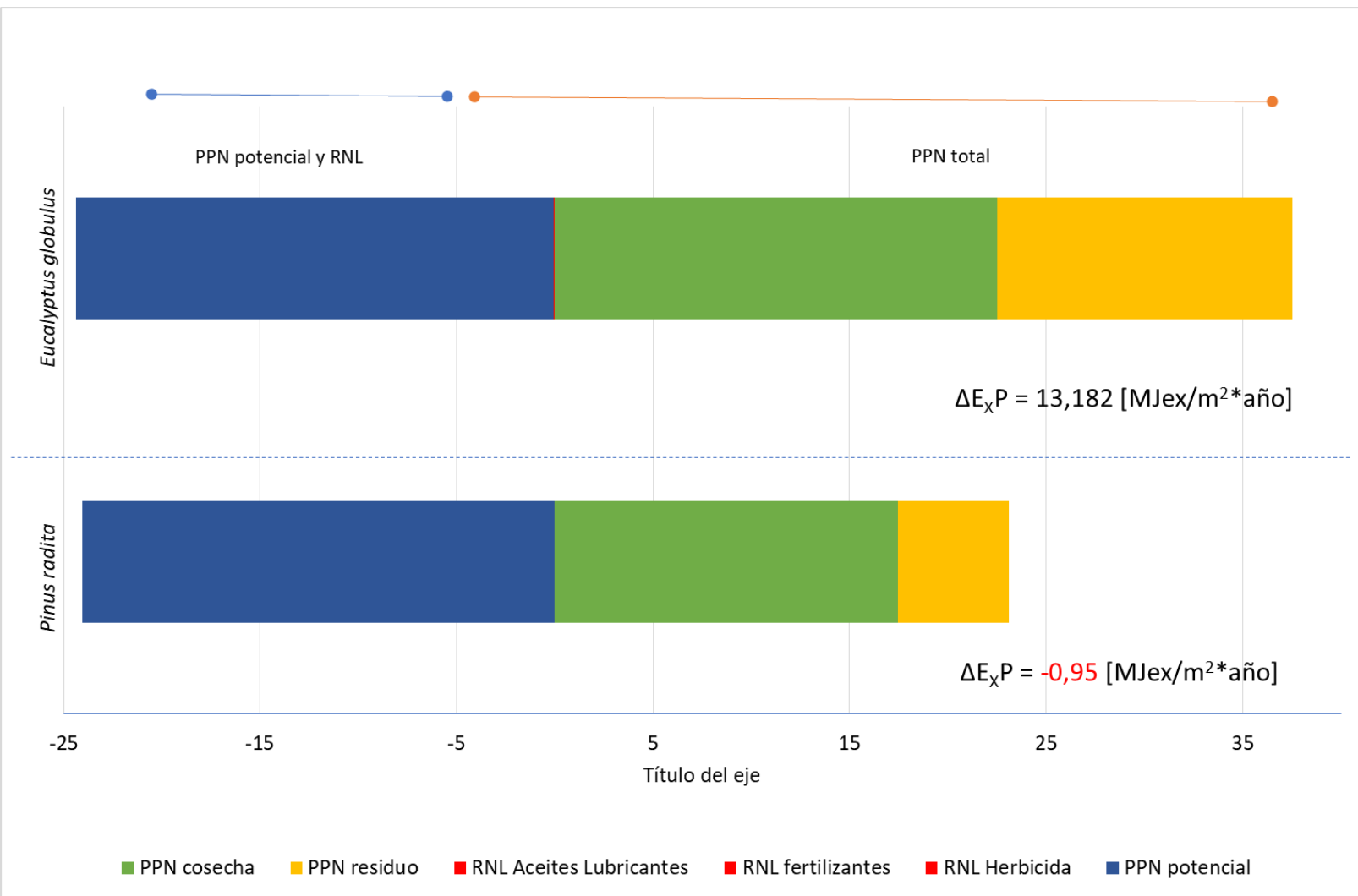


Figura 16. balance de Exergía con biomasa útil, PPN cosecha y PPN residuos.

Fuente: Elaboración propia.

